

DIE NEUE ELEKTRISCHE MASCHINE »AUTODYNE«

O. BENEDIKT

Lehrstuhl für spezielle elektrische Maschinen an der Technischen Universität, Budapest

(Eingegangen am 3. Januar 1958)

1. Die bisherigen Versuche der Ersetzung des Motorgenerators durch einen Einankerumformer

a) Die Bedeutung des Problems

Auf vielen Gebieten der Technik verwendet man zur Gleichstromerzeugung Motorgeneratoren, die ihre Gleichspannung in breiten Grenzen ändern können. Allerdings haben sie große Nachteile, wie z. B. große Dimensionen und hohes Gewicht, beträchtliche Leistungsverluste und den Umstand, daß die mechanische Leistung durch eine Welle übertragen werden muß. Wenn man eine Asynchronmaschine als Motor verwendet, kommt zu diesen Nachteilen noch ein relativ niedriger Leistungsfaktor hinzu, hauptsächlich bei Teillast, und auch der Umstand, daß bei Stoßbelastungen sich die Drehzahl stark verringert und sogar die Möglichkeit des Kippens eintreten kann.

Bekanntlich weisen die Einankerumformer diese Nachteile nicht auf. Sie haben nur ein einziges Magnetsystem und formen den Wechselstrom in Gleichstrom unmittelbar in einer einzigen Ankerwicklung um, die elektrisch mit einem Stromwender verbunden ist. Hierbei ist in dieser Wicklung der Wechselstrom dem Gleichstrom entgegengesetzt gerichtet, was zur Folge hat, daß Gewicht, Dimensionen und Leistungsverluste wesentlich kleiner werden. Auch kann der Einankerumformer mit einem Leistungsfaktor gleich eins oder sogar mit voreilemendem Strome arbeiten. Schließlich wird die Leistung nicht durch die Welle übertragen.

Noch größere Vorteile könnten die Einankerumformer haben, wenn sie solche Maschinengruppen ersetzen könnten, die aus mehreren, auf einer einzigen Welle montierten Gleichstromgeneratoren bestehen, die von einem Gleichstrommotor angetrieben werden. In diesen Fällen, wie z. B. bei Exkavatoren, vergrößern sich die Dimensionen des ganzen Mechanismus sehr stark wegen der ausgedehnten Länge der Maschinengruppe; wenn man dagegen letztere durch mehrere Einankerumformer ersetzen könnte, die an verschiedenen Stellen angeordnet sein mögen, ergibt sich die Möglichkeit, den ganzen Mechanismus wesentlich kleiner zu gestalten.

Trotz der geschilderten Vorteile der Einankerumformer konnten sie lange Zeit hindurch nicht als Ersatz von Motorgeneratoren angewendet wer-

den, weil der gewöhnliche Einankerumformer nicht erlaubt, die Gleichspannung in breiten Grenzen zu regeln.

In dieser Maschine induziert ein und derselbe magnetische Erregerfluß Φ' (Abb. 1) in der Gleichstromwicklung 1 eine Gleichspannung und in den drei Phasen derselben Wicklung

$$a - b, b - c, c - a$$

eine Wechselspannung. Deshalb müssen die genannten Spannungen zueinander proportional sein.

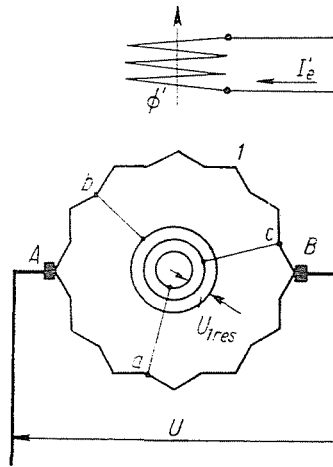


Abb. 1

Da den magnetischen Fluß Φ' eine Erregerwicklung hervorruft, die vom Strom I'_e durchflossen wird und im gewöhnlichen Einankerumformer in der Richtung der Längsachse angeordnet ist, wirkt die innere Gleichspannung längs der Querachse der Maschine zwischen den Bürsten A und B . Die induzierte Spannung der Wechselstromseite ist ungefähr gleich der Netzspannung U_{1res} . Die induzierte Spannung der Gleichstromseite ist beiläufig gleich der Spannung U . Daraus folgt, daß die Gleichspannung U zwischen den Bürsten $A - B$ praktisch proportional der Netzspannung U_{1res} und daher nicht regelbar ist.

Das Problem der Ersetzung des Motorgenerators durch einen Einankerumformer ist so wichtig, daß schon seit mehreren Jahrzehnten auf verschiedenen Wegen versucht wird, die Gleichspannung des letzteren regelbar zu machen. Von diesen Wegen seien im folgenden jene drei voneinander grundverschiedenen erläutert, die, wenn sie auch keineswegs eine Lösung gebracht haben, doch zweifellos als sehr interessant betrachtet werden müssen.

b) K. Schenfers Vorschlag

Den einen Weg wies K. SCHENFER, der im Jahre 1928 vorschlug, die Gleichspannung des Einankerumformers auf folgende originelle Weise innerhalb von breiten Grenzen zu regeln. Seinem Vorschlag gemäß besaß der Ständer der Maschine zwei Erregerwicklungen, welche längs zweier aufeinander senkrechter Achsen wirkten. Durch die Änderung der Durchflutung jeder dieser Wicklungen konnte man die räumliche Lage des aus einer Längs- und einer Querkomponente bestehenden, magnetischen Flusses ändern. Der resultierende Fluß ist hierbei in jeder beliebigen Lage praktisch konstant, da die durch ihn induzierte Phasenspannung der gegebenen Netzspannung das Gleichgewicht halten muß. Daraus folgt, daß sich die Längskomponente des Erregerflusses bei Vergrößerung der Querkomponente entsprechend verkleinert und infolgedessen auch die zwischen den unbeweglichen Bürsten induzierte Gleichspannung. Bei Anwendung des von K. SCHENFER vorgeschlagenen Regelprinzips wurde es also möglich, zwischen den Bürsten des Einankerumformers eine innerhalb der Werte $+U_{\max}$ und $-U_{\max}$ stufenlos regelbare Spannung zu erhalten.

Es ist nicht schwer einzusehen, daß das auf diesem Prinzip beruhende Schaltungsschema — welches im weiteren »allgemeines Schaltungsschema des Einankerumformers« genannt werden wird — den allgemeinen Fall dieser Maschinenart darstellt, während der in Abb. 1 gezeigte »gewöhnliche« Einankerumformer einen Einzelfall zeigt, in welchem die Querkomponente des resultierenden magnetischen Flusses fehlt.

Daß das oben erläuterte Prinzip tatsächlich die stufenlose Regelbarkeit der Gleichspannung eines Einankerumformers ermöglicht, sei an einem Ausführungsbeispiel erläutert, mit dessen Hilfe wir gleichzeitig auch bestimmte, im weiteren häufig verwendete Grundbegriffe klären wollen.

Es sei angenommen, daß von den beiden oben erwähnten Erregerwicklungen die eine in der Längsachse und die andere in der Querachse der Maschine wirkt (Abb. 2a).

Der Einfachheit halber werden wir annehmen, daß die Maschine eine in allen Richtungen gleichmäßige magnetische Leitfähigkeit hat, sich im Zustand des Leerlaufes befindet und vernachlässigbare Kupfer- und Eisenverluste besitzt.

Außerdem vernachlässigen wir alle inneren Drehmomente, wie beispielsweise das Reibungsmoment. Abb. 2a stellt das Schema einer solchen Maschine dar, wobei die Schleifringe, die zur Speisung des Ankers mit Dreiphasenstrom dienen, nicht gezeigt sind. Die durch den Erregerstrom I'_e hervorgerufene vertikale Durchflutung θ'_e und die durch den Erregerstrom I_e bewirkte horizontale Durchflutung θ_e erzeugen zusammen einen Fluß, dessen räumliche Grundwelle $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ mit der Vertikalachse der Maschine den Winkel β bildet.

Dieser Fluß induziert im Anker die Spannung $\bar{E}_{1\text{res}}$, welche ihm um einen zeitlichen Winkel von 90° voreilt (Abb. 2b).

Hier, wie auch im weiteren, wo Statordurchflutungen prinzipiell, d. h. ohne Bezug auf ihre konkrete Anordnung auf Polen, dargestellt sind, entspricht die Größe θ der Durchflutung pro Pol.

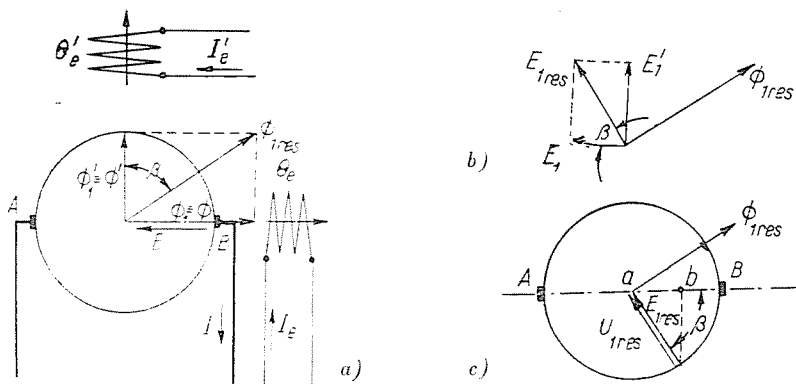


Abb. 2

Zerlegen wir den Fluß $\Phi_{1\text{res}}$ (Abb. 2a) in die Komponente

$$\Phi_1' = \Phi_{1\text{res}} \cos \beta, \quad (1)$$

die längs der vertikalen Achse der Maschine wirkt, und in die Komponente

$$\Phi_1 = \Phi_{1\text{res}} \sin \beta, \quad (2)$$

welche längs der Querachse der Maschine wirkt. Hierbei ist Φ_1' die räumliche Grundwelle des wirklichen Längsflusses Φ' und Φ_1 die räumliche Grundwelle des wirklichen Querflusses Φ .

Der magnetische Fluß Φ' induziert zwischen den Bürsten A und B die Gleichspannung E . Daraus folgt, wenn wir die Konstanz der Drehgeschwindigkeit des Ankers berücksichtigen, daß

$$E \sim \Phi'.$$

Da die Größen $\frac{\Phi}{\Phi_1}$ und $\frac{\Phi'}{\Phi_1'}$ praktisch nur von der Konfiguration der Maschine abhängen und deshalb konstant sind und da $\Phi_{1\text{res}}$ und $E_{1\text{res}}$ zueinander proportional sind, erhalten wir

$$E = c_1 E_{1\text{res}} \cdot \cos \beta, \quad (3)$$

wo c_1 ein Proportionalitätskoeffizient ist. Wenn $\beta = 0$, ist

$$E_0 = E_{\max} = c_1 E_{1\text{res}}. \quad (4)$$

Daraus folgt, daß

$$E = E_{\max} \cdot \cos \beta. \quad (5)$$

Wenn man im Diagramm der zeitlichen, sich auf eine Phase beziehenden Vektoren, den Vektor $E_{1\text{res}}$ in die Komponenten

$$E_1 = E_{1\text{res}} \cdot \cos \beta \quad (6)$$

und

$$E_1' = E_{1\text{res}} \cdot \sin \beta \quad (7)$$

zerlegt, so erhält man aus (3) und (6), daß

$$E = c_1 E_1. \quad (8)$$

Hierbei ergibt sich, daß der Winkel zwischen der Richtung der Querachse der Bürsten A und B , längs derer E wirkt, und der räumlichen Richtung des Flusses $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ dieselbe Größe $90^\circ - \beta$ besitzt wie der Winkel zwischen den zeitlichen Vektoren \bar{E}_1 und $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$.

Daraus folgt, daß wenn man das Diagramm der zeitlichen Phasenvektoren (Abb. 2b) in der Lage zeichnet, in welcher der Vektor $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ dem Vektor $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ (Abb. 2a) parallel ist, wir das Resultat erhalten, daß die Richtung der Spannung E in Abb. 2a mit der Richtung des Vektors \bar{E}_1 in Abb. 2b zusammenfällt.

Um möglichst anschauliche Resultate zu bekommen, werden wir im weiteren folgende Methode anwenden. Anstatt die Figuren 2a und 2b einzeln darzustellen, vereinigen wir sie in eine einzige, wie es die Abb. 2c zeigt, indem wir den Vektor $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ der räumlichen Grundwelle des Magnetflusses gleichzeitig auch als zeitlichen Vektor $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ des Flusses benutzen, der in der Phasenwicklung die Spannung $\bar{E}_{1\text{res}}$ induziert. Bei dieser Methode bildet der Vektor der Spannung $E_{1\text{res}}$ mit der Achse der Bürsten A und B den Winkel β . Hierbei erhalten wir eine sehr anschauliche Darstellung des Einflusses der räumlichen Lage des Vektors $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ auf die Größe E , da $E_{1\text{res}}$ senkrecht zum Vektor $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ ist, während die Größe E der Projektion $a - b$ des Vektors $\bar{E}_{1\text{res}}$ auf die Horizontalachse der Bürsten A und B proportional ist.

Laut der angewandten Methode müssen wir auch alle übrigen zeitlichen Phasenvektoren mit dem allgemeinen Vektordiagramm in Übereinstimmung bringen, wobei ihre Lage durch ihre relative Lage im Vergleich zu den zeitlichen Vektoren $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ und $\bar{E}_{1\text{res}}$ bestimmt wird. Zum Beispiel nimmt der Vektor der Phasennetzspannung $\bar{U}_{1\text{res}}$, der bei der von uns vereinbarten Verein-

fachung dem Vektor der Spannung $\bar{E}_{1\text{ res}}$ das Gleichgewicht hält, eine Lage ein, die mit der des Vektors $\bar{E}'_{1\text{ res}}$ zusammenfällt, wobei die Größen der genannten Vektoren einander gleich sind.

Der Einfachheit halber wurde angenommen, daß nach der Zusammenlegung (Abb. 2c) die positiven Richtungen der Vektoren $\bar{\Phi}_1$ und \bar{E}_1 dieselben sind wie vor der Zusammenlegung (Abb. 2a und 2b). Daher ist $\div\bar{\Phi}_1$ (und mithin auch der Fluss Φ) von links nach rechts gerichtet, während $\div\bar{E}_1$ (und daher auch die Spannung E) umgekehrte Richtung zeigen. Die positiven Richtungen von $\bar{\Phi}'_1$ und von \bar{E}'_1 fallen zusammen.

Abb. 2c zeigt in anschaulicher Weise, daß die Anordnung gemäß Abb. 2a tatsächlich geeignet ist, die Gleichspannung des Einankerumformers innerhalb eines breiten Bereiches stufenlos zu regeln, und veranschaulicht auch die Grenzen dieses Bereiches. Wenn wir das gegenseitige Verhältnis der Ströme I'_e und I_e derart ändern, daß die Flüsse Φ'_1 und Φ' gleichzeitig den Gleichungen (1) und (2) entsprechen, dreht sich demgemäß im Raume der Vektor $\bar{\Phi}_{1\text{ res}}$ und mit ihm laut Abb. 2c die Vektoren $E_{1\text{ res}}$ und $U_{1\text{ res}}$, wobei die Gleichspannung proportional zur Strecke $a - b$ ist. Da der Punkt b längs des die beiden Bürsten A und B verbindenden Durchmessers jede mögliche Lage einnehmen kann, sehen wir, daß die Gleichspannung E stufenlos von einem Wert $\div E_{\text{max}}$ (bei $\beta = 0$) über 0 (bei $\beta = 90^\circ$) bis $-E_{\text{max}}$ (bei $\beta = 180^\circ$) geregelt werden kann.

c) Die beiden Vorschläge Mellers

Einen prinzipiell vollkommen anderen Weg wies MELLER im Jahre 1926 in zwei Artikeln (E. u. M. 1926 Heft 9 und Heft 37). Im weiteren sei seine Grundidee anhand der oben festgelegten Methode erläutert.

Nehmen wir an, daß die Erregerwicklung des Ständers in Abb. 1 entfernt ist. In diesem Falle wirkt der über die Schleifringe 1, 2, 3 gespeiste Läufer 4 des Einankerumformers EU (Abb. 3) wie eine dreiphasige Drosselspule, und der Fluß $\bar{\Phi}_{1\text{ res}}$, der die der Netzspannung $\bar{U}_{1\text{ res}}$ das Gleichgewicht haltende Spannung $E_{1\text{ res}}$ induziert, wird durch einen aus dem Netz entnommenen magnetisierenden Läuferstrom $\bar{I}_{m\text{ res}}$ erregt. Wenn der Läufer — ebenso wie gemäß Abb. 1 und 2 — synchron läuft, steht der Fluß im Raume still, was zur Folge hat, daß auch die zwischen den Bürsten A und B entstehende Gleichspannung (s. auch Abb. 2c) konstant bleibt. Gehen wir des weiteren von denselben vereinfachenden Voraussetzungen aus wie in bezug auf Abb. 2, so ergibt sich, daß der Fluß $\bar{\Phi}_{1\text{ res}}$ jede beliebige Richtung im Raume einnehmen kann, was — wie wir weiter oben sahen — bedeutet, daß sich die Gleichspannung innerhalb der Grenzen $\pm E_{\text{max}}$ ändern kann. Es entsteht aber

das Problem, was den Läufer zwingt, synchron zu laufen und ihn daran hindert, den Lauf zu verlangsamen oder zu beschleunigen. Im Falle der Maschine gemäß Abb. 2 ist dies die resultierende Ständererregung, die den Fluß $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ zwingt, sich in derselben Richtung einzustellen und in ihr zu verbleiben. Im Falle der Maschine *EU* in Abb. 3 fehlt aber diese Richtkraft.

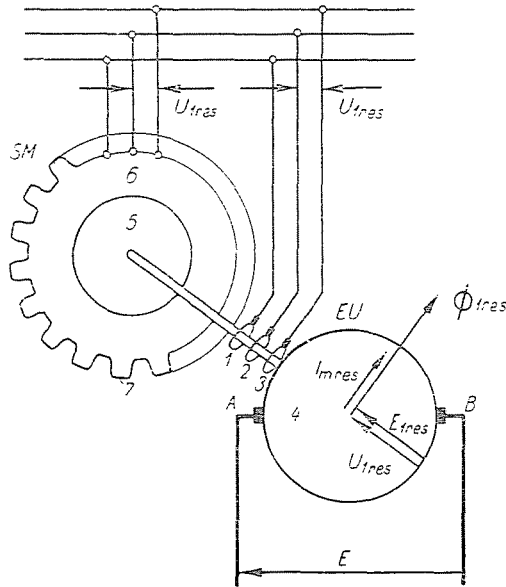


Abb. 3

MELLER versuchte, dieses Problem durch Verwendung einer besonderen, mit *EU* mechanisch gekoppelten Synchronmaschine *SM* zu lösen.

In der Tat, wenn wir dieselben vereinfachenden Verhältnisse annehmen wie für die Maschine *EU*, dann ergibt sich, daß die vom Läuferstrom erzeugte Erregung $\bar{\Theta}_L$ (Abb. 4) um 90° der Spannung nacheilt, die vom Ständerstrom erzeugte Erregung $\bar{\Theta}_st$ ihr um 90° voreilt und ihre Differenz $\bar{\Theta}_\phi$ den Erregerfluß erzeugt, der die der Netzspannung $\bar{U}_{1\text{res}}$ das Gleichgewicht haltende innere Spannung induziert. Würden sich die beiden miteinander gekoppelten Läufer 4 und 5 verlangsamen oder beschleunigen, würde in *SM* ein Drehmoment entstehen, welches die Läufer wieder in Synchronismus bringen würde.

Jetzt blieb MELLER noch die Frage zu lösen, auf welche Weise unter solchen Umständen die Drehung des Flusses $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ erzielt werden kann, ohne die eine Regelung der Gleichspannung nicht möglich ist. Zu diesem Zweck schlug er vor, den Stator 6 der Synchronmaschine (z. B. mit Hilfe des Zahnkranzes 7) verdrehbar auszugestalten, wie dies in Abb. 3 schematisch dargestellt ist.

Wenn wir den Stator verdrehen, verdrehen sich mit ihm auch die Vektoren \bar{U}_{1res} , $\bar{\Theta}_{st}$ und $\bar{\Theta}_\phi$ in Abb. 4, wodurch die Läufer 4 und 5 gezwungen sind, sich so lange zu drehen, bis der Vektor $\bar{\Theta}_L$ mit der neuen Richtung von $\bar{\Theta}_\phi$ zusammenfällt. Solcherart erzielte MELLER denselben Effekt durch mechanische Mittel, wie SCHENFER auf elektrische Weise.

Einen weiteren möglichen Weg zur stufenlosen Regelung der Gleichspannung wies ebenfalls MELLER im bereits erwähnten Artikel. Um die von ihm vorgeschlagene Schaltung zu verstehen, wollen wir das Problem zuerst im allgemeinen stellen.

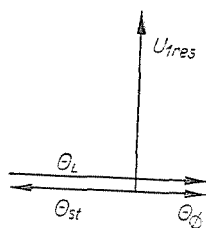


Abb. 4

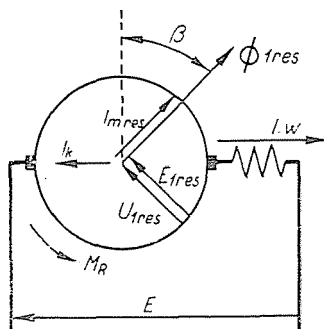


Abb. 5

Nehmen wir an, daß die Maschine EU gemäß Abb. 3 von der Synchronmaschine SM abgeschaltet wird. Trotzdem wird sie — da wir ja angenommen haben, daß sämtliche inneren Drehmomente, wie z. B. das durch die Reibung erzeugte, vernachlässigt werden können — synchron weiter laufen. Ganz anders steht aber die Sache, wenn wir das Reibungsmoment M_R berücksichtigen. Da es der Drehrichtung entgegengesetzt ist, wirkt es bremsend und ist bestrebt, den Fluß $\bar{\Phi}_{1res}$ gegen den Uhrzeigersinn zu verdrehen. Diese Drehung kann aber verhindert werden, wenn wir in der Querachse eine rechtsgerichtete Durchflutung I_w anbringen (Abb. 5), die mit der Längskomponente $\bar{\Phi}'_1$ des Flusses $\bar{\Phi}_{1res}$ ein M_R entgegengesetztes und gleich großes Drehmoment erzeugt. Das Gleichgewicht stellt sich ein, wenn

$$M_R = c \Phi'_1 I_w, \quad (9)$$

wobei c konstant ist. Hiermit erhalten wir bei Berücksichtigung der Gleichungen (3), (1) und (9), daß

$$E = c_1 E_{1res} \cdot \cos \beta = c_1 E_{1res} \frac{\Phi'_1}{\Phi_{1res}} = \frac{c_1 E_{1res} M_R}{\Phi_{1res} \cdot c \cdot I_w}. \quad (10)$$

Wir sehen also, daß auf diese Weise E durch Änderung des Stromes I stufenlos geregelt werden kann. Als einen solchen Strom verwendete MELLER den Belastungsstrom, wie in Abb. 5 gezeigt, um dadurch der Volt-Ampere Kennlinie eine hyperbolische Form zu geben.

d) Kritische Untersuchung der erwähnten drei Vorschläge

Von den drei oben erläuterten Vorschlägen hat sich wegen der mit ihnen verbundenen Nachteile praktisch keiner durchgesetzt. Wir wollen die Ursachen dieser Tatsache untersuchen, da es nur auf dieser Grundlage möglich ist, sämtliche auftretenden Schwierigkeiten zu erkennen und den richtigen Weg zu weisen, auf dem es gelingen kann, das Problem der Ersetzung des Motorgenerators durch einen Einankerumformer vollständig zu lösen.

Betrachten wir zuerst die Nachteile der Anordnung gemäß Abb. 3. Hier ist vor allem der Umstand zu erwähnen, daß die Antriebs-Synchronmaschine dem Anschein nach zwar nur für die Reibungsleistung aufzukommen hat, in Wirklichkeit aber für weit größere Dimensionen ausgelegt werden muß. Man darf nämlich nicht vergessen, daß der Einankerumformer wie jede Synchronmaschine zur Aufrechterhaltung des stabilen Laufes des Auftretens genügend großer synchronisierender Momente bedarf, die bei einem eventuellen Abweichen vom Synchronismus den letzteren wiederherzustellen suchen. In den Maschinen gemäß Abb. 1 und 2 entstehen diese Momente durch das Zusammenwirken der Erregerdurchflutungen im Ständer und von Ausgleichsströmen im Läufer. Im Falle gemäß Abb. 3 entstehen hingegen im Einankerumformer beim Abweichen vom Synchronismus keine synchronisierenden Momente, da ja die Ständerwicklungen fehlen. Der stabile Lauf kann also nur durch die synchronisierenden Momente der Maschine SM aufrechterhalten werden. Diese können aber der Scheinleistung der Maschine proportional angenommen werden. Daraus folgt, daß die Maschine SM sehr stark überdimensioniert werden muß und daß sie trotzdem nicht den Stabilitätsgrad eines Einankerumformers erreichen kann, da sie ja nicht nur die Trägheit des eigenen Läufers zu überwinden hat, sondern auch die des Läufers der Maschine EU . Auf diese Weise verliert der Einankerumformer seinen größten Vorteil gegenüber dem Motorgenerator und zwar den, daß er nur aus einer einzigen Maschine besteht.

Ein weiterer großer Nachteil der Anordnung gemäß Abb. 3 besteht offensichtlich darin, daß der Ständer der Maschine SM mechanisch verdreht werden muß.

Ferner ist auch leicht einzusehen, daß in der Maschine EU große Kommutationschwierigkeiten auftreten müssen, da ja der Querfluß Φ_1 offenbar teilweise durch die Kommutationszone geht.

Schließlich führt das Vorhandensein eines aus dem Drehstromnetz entnommenen Magnetisierungsstromes einerseits zu einer Verschlechterung des Leistungsfaktors und andererseits aus thermischen Gründen zur Verringerung des zulässigen Belastungsstromes.

Auch bei der Anordnung gemäß Abb. 5 ist die Synchronisierung nicht genügend gesichert. Zwar besitzt sie eine Ständerdurchflutung, doch ist diese unvergleichlich geringer als die Erregerdurchflutungen gemäß Abb. 1 oder 2, da sie ja zum Unterschied von den letzteren nicht der durchgehenden Leistung, sondern nur der Reibungsleistung entsprechend berechnet ist.

Die Anordnung gemäß Abb. 5 weist aber nicht nur in dynamischer Beziehung, sondern auch vom Standpunkt der Betriebseigenschaften große Nachteile auf. Wie Gleichung (10) zeigt, ist das Verhältnis zwischen Spannung E und Belastungsstrom I bei bestimmtem Reibungsmoment gegeben, d. h. die Maschine hat nur eine einzige Volt-Amperekennlinie, während mit Hilfe eines Motorgenerators bei gegebenem Belastungsstrom die Spannung stufenlos geregelt werden kann. Ferner ist zu bedenken, daß das Reibungsmoment keine konstante Größe, sondern beträchtlichen Schwankungen unterworfen ist, woraus folgt, daß sogar die erwähnte einzige Kennlinie in Wirklichkeit keine Linie, sondern einen ziemlich breiten Streifen darstellt. Wir sehen also, daß die Maschine gemäß Abb. 5 schon in bezug auf ihr normales Betriebsverhalten mit dem Motorgenerator nicht konkurrieren kann.

Aus den obigen Erläuterungen geht hervor, daß von den drei erwähnten Wegen zur Lösung des Problems der stufenlosen Spannungsregelung, der gemäß Abb. 2 noch als der beste erscheint. Diese Anordnung bedarf keines Hilfsmotors, besitzt Ständererregerdurchflutungen derselben Größenordnung wie im gewöhnlichen Einankerumformer (Abb. 1) und daher auch ebenso große synchronisierende Momente und schließlich nimmt ihr Läufer keinen Magnetisierungsstrom auf.

Daß trotz alledem auch die Anordnung gemäß Abb. 2 keine praktische Anwendung fand und sich gegen den Motorgenerator nicht durchsetzen konnte, hat wohl folgende drei Hauptursachen:

1. Die zwischen den Bürsten bei einem bestimmten Winkel β erhaltene Gleichspannung E ist sogar bei Leerlauf nicht konstant, sondern gemäß Gleichung (3) der Netzspannung E_{1res} proportional, die bekanntlich praktisch innerhalb eines beträchtlichen Bereiches schwanken kann.

2. Bekanntlich hat der Einankerumformer (Abb. 1) die unangenehme Eigenschaft, daß bei Belastungsstößen die Änderung des Wechselstromes im Läufer hinter der Änderung des Gleichstromes zurückbleibt, wodurch im Läufer eine Querdurchflutung entsteht, die mit dem in der Längsachse wirkenden Erregerfluß des Ständers ein Drehmoment hervorruft. Infolgedessen beginnt der Läufer zu pendeln, was den normalen Gleichgewichtszustand zwischen der im Läufer durch den Gleichstrom und der durch den Drehstrom erzeugten

Durchflutung stört. Dies hat zur Folge, daß periodisch die Richtung wechselnde Querdurchflutungen auftreten, die die »dynamische« Kommutation enorm erschweren. Da bei der Anordnung gemäß Abb. 2 ebenfalls ein Längsfluß Φ' vorhanden ist, treten in ihr bei Belastungsänderungen ähnliche Erscheinungen auf.

Wenn man bedenkt, daß der Motorgenerator oft auf solchen Gebieten verwendet wird, wo häufig starke Belastungsänderungen vorkommen, die vom Generator gut vertragen werden, so wird klar, daß auch in dieser Beziehung Anordnungen, die prinzipiell Abb. 2 entsprechen, keinen erfolgreichen Wettbewerb mit ihm aufnehmen könnten.

3. In den letzten Jahrzehnten hat eine stürmische Entwicklung mit dem Ziel eingesetzt, den äußeren Kennlinien des Gleichstromgenerators selbsttätig eine besondere Gestalt zu verleihen. Dies erfolgt entweder durch Anordnung besonderer Wicklungen oder Stromkreise (z. B. die KRÄMERSche oder die ROSENBERGSche Maschine) oder indem der Generator als Verstärkermaschine ausgebildet ist (z. B. die Amplidyne). Es ist klar, daß die Anordnung gemäß Abb. 2 diese modernen Ansprüche nicht befriedigen konnte.

Würde es aber gelingen, den Einankerumformer nicht nur von den weiter oben angeführten Nachteilen zu befreien, sondern ihn auch als Regelmachine oder gar als Verstärkermaschine zu verwenden, hätte dies um so größere Bedeutung, als sich immer wieder zeigt, daß je mehr man die Maschinenleistungen vergrößert, desto mehr viele prinzipielle Nachteile des Motorgenerators in den Vordergrund treten:

Oft macht der Umstand Schwierigkeiten, daß die Regel- oder Verstärkermaschinen einen Antrieb brauchen oder auf der Welle der zu regelnden Maschine sitzen müssen, was eine Vergrößerung der Länge der Maschinen-Gruppe bedeutet.

Bei Stoßbelastungen kann es vorkommen, daß der Asynchronmotor, der den Regelgenerator antreibt, die Geschwindigkeit stark vermindert oder sogar die Stabilität verliert. Außerdem ruft eine weitere Vergrößerung der Leistung bei vielen elektrischen Regel- und Verstärkermaschinen prinzipielle Schwierigkeiten hervor.

Ausgehend von der kritischen Analyse der bisher bekanntgewordenen Lösungsversuche hat sich der Autor die Aufgabe gestellt, sämtliche oben aufgezählten Nachteile und Mängel des Einankerumformers zu beseitigen. Im Prozeß der langjährigen Arbeit an diesem Problem, die der Autor auf Grund der Gastfreundschaft der Sowjetunion als Leiter verschiedener Kollektive wissenschaftlicher Arbeiter theoretisch und experimentell zu führen die Möglichkeit hatte, wurde eine prinzipiell neue elektrische Maschine geschaffen — die AUTODYNE —, die frei von den angeführten Fehlern des Einankerumformers ist, über alle Vorteile gegenüber dem Motorgenerator in bezug auf Raumbedarf, Gewicht, Wirkungsgrad und die Möglichkeit, voreilenden

Strom in das Netz abzugeben, verfügt. Außerdem hat sie folgende Eigenschaften :

1. Die Autodyne vereinigt in sich einen Energieumformer und eine auf einem neuen Prinzip beruhende selbsttätig wirkende elektrische Regelmachine.

2. Die Autodyne ermöglicht die selbsttätige Regelung einer beliebigen elektrischen Größe, auf die sie einwirkt, wobei diese Größe konstant sein oder sich nach gewissen Gesetzen ändern kann.

3. In den meisten Schaltungsschemas der Autodyne kann ihre Steuerung mit Hilfe von Leistungen ermöglicht werden, die bedeutend kleiner sind als die Erregerleistung gewöhnlicher Generatoren. Deshalb stellt die Autodyne auch eine neue Art von elektrischer Verstärkermachine dar.

Im folgenden soll eine kurze Darstellung einiger Fragen der Theorie der Autodyne gegeben werden.

2. Die Erzeugung des sich im Zustande indifferenten Gleichgewichtes befindenden Magnetsystems der Autodyne

Nehmen wir an, daß wir bei der Anordnung gemäß Abb. 2 die Statorwicklungen und die von ihnen hervorgerufenen Durchflutungen θ_e und θ'_e beseitigen.

In diesem Falle wird der resultierende Erregerfluß $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ durch die Durchflutung des Magnetisierungsphasenstroms $\bar{I}_{m\text{res}}$ hervorgerufen, den der Anker aus dem Dreiphasennetz erhält, und die durch den Fluß $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ induzierte Phasenspannung $\bar{E}_{1\text{res}}$ hält der Netzspannung $\bar{U}_{1\text{res}}$ das Gleichgewicht (Abb. 6).

Wir erhalten also im Einankerumformer dieselben Verhältnisse wie in der Maschine *EU* (Abb. 3), allein mit dem entscheidenden Unterschied, daß der Läufer keine Antriebsmaschine besitzt. Untersuchen wir die sich hierbei ergebenden Verhältnisse :

Nehmen wir an, daß sich der Fluß $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ in bezug auf den Anker gegen den Uhrzeigersinn mit der synchronen Geschwindigkeit

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (11)$$

dreht und daß sich der Anker selbst im Uhrzeigersinn dreht. Dann kann man in Abhängigkeit von der Größe der Ankerdrehgeschwindigkeit drei Fälle unterscheiden :

1. Wenn $n < n_s$, dreht sich der Fluß $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ im Raum mit der Geschwindigkeit $n_s - n$ gegen den Uhrzeigersinn (Abb. 6).

Da sich aber der Winkel β proportional zur Zeit ändert, ändert sich die Spannung E der Formel (3) gemäß nach dem Sinusgesetz. Deshalb entsteht

zwischen den Bürsten *A* und *B* die Wechselstromspannung U_{\sim} , die die Frequenz

$$\frac{p(n_s - n)}{60}$$

besitzt.

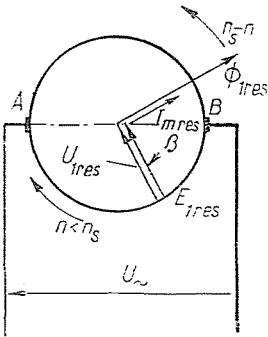


Abb. 6

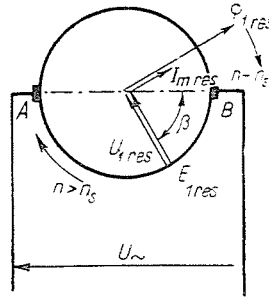


Abb. 7

2. Wenn $n > n_s$, dreht sich der Fluß $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ im Raum mit der Geschwindigkeit $n - n_s$ im Uhrzeigersinn (Abb. 7). Infolgedessen entsteht zwischen den Bürsten *A* und *B* wieder eine Wechselspannung U_{\sim} mit der Frequenz $p(n - n_s)$.

60

3. Wenn $n = n_s$, dreht sich der Fluß $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ im Raume nicht und der Winkel β wird konstant sein; deshalb hat in diesem Falle die zwischen den Bürsten *A* und *B* (Abb. 8) entstehende Spannung die konstante Größe

$$U = U_{\text{max}} \cdot \cos \beta = c_1 U_{1\text{res}} \cdot \cos \beta, \tag{12}$$

wobei U die maximale Größe U_{max} dann hat, wenn $\beta = 0$.

Der zweite und dritte Fall erscheint auf den ersten Blick unreal, da beim Fehlen von Statorwicklungen kein Drehmoment entsteht, welches dem Reibungsmoment entgegengesetzt wäre. Infolgedessen kann sich der Anker offenbar nicht synchron drehen.

Indessen nehmen wir an, daß das Reibungsmoment M_R auf irgendeinem Wege beseitigt wurde und auch andere denkbare innere Drehmomente nicht auf den Anker wirken wie z. B. die Momente, die infolge der Hysterese und der in verschiedenen Richtungen verschieden großen magnetischen Leitfähigkeit entstehen.

In diesem Falle behält der Anker, nachdem er aus einem beliebigen Grunde auf die Geschwindigkeit n_s beschleunigt wurde, diese Drehzahl bei und deshalb werden die Größen β und U konstant bleiben. Dabei kann der

Magnetfluß $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ jede beliebige Lage in Abhängigkeit davon einnehmen, bei welcher Lage des Flusses $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ der Anker den Synchronismus erreicht hat, d. h. er wird sich im Zustand des indifferenten Gleichgewichtes befinden und die Spannung U kann eine beliebige Größe innerhalb der Grenzen $\pm U_{\text{max}}$ erhalten.

Das System gemäß Abb. 8 muß offenbar auf das Erscheinen beliebiger zusätzlicher Durchflutungen und der von ihnen hervorgerufenen Drehmomente sehr empfindlich reagieren.

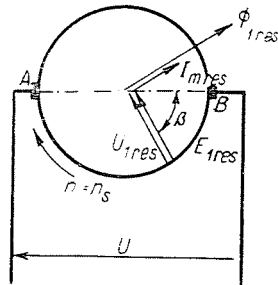


Abb. 8

Bei der Untersuchung dieser Eigenschaften werden wir von folgenderbekannter Tatsache ausgehen. Wenn im Einankerumformer zur Durchflutung, die den Erregerstrom hervorruft, noch irgendeine Durchflutung im Stator oder Rotor hinzugefügt wird, so ist in bezug auf die infolge dieser zusätzlichen Durchflutung entstandenen Spannung das Netz praktisch kurzgeschlossen, da $\bar{U}_{1\text{res}}$ schon durch $\bar{E}_{1\text{res}}$ im Gleichgewicht gehalten wird. Daher wird der Anker aus dem Netz einen Dreiphasenstrom aufnehmen, der im weiteren »Kompensationsstrom« genannt wird, dessen Durchflutung die obenerwähnte, zusätzliche Durchflutung praktisch kompensiert.

Wenn man nun im Stator (Abb. 8) den Durchflutungsimpuls $-\Delta\theta'$ (Abb. 9) hervorruft, entsteht in der Ankerwicklung ein Kompensationsstrom von der Größe

$$+\Delta I_1' = c_2 \Delta\theta' \quad (13)$$

(wobei c_2 konstant ist). Eine Komponente dieses Stromes von der Größe $c_2 \Delta\theta' \sin \beta$ fällt in bezug auf Richtung mit dem Vektor $\bar{U}_{1\text{res}}$ zusammen, d. h. sie stellt einen Motorstrom dar, der ein Beschleunigungsmoment hervorruft. Unter seinem Einfluß vergrößert sich die Drehzahl des Ankers n_s über den Synchronismus hinaus, d. h. es ergeben sich die in Abb. 7 charakterisierten Bedingungen, und die Vektoren $\bar{U}_{1\text{res}}$, $\bar{E}_{1\text{res}}$, $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ und $\bar{I}_{m\text{res}}$ drehen sich in der Richtung des Uhrzeigers bis zu jener Lage (Abb. 10), bei der $\Delta I_1'$ schon keine aktive Komponente besitzt. Wie man sieht, ändert sich in diesem Falle die Spannung U von $+U$ bis $-U_{\text{max}}$. Im Falle der Erzeugung eines entgegen-

gesetzten Impulses $+\Delta\theta'$, welcher ein den Anker verlangsamendes Moment hervorruft, drehen sich offenbar die Vektoren \bar{U}_{1res} , \bar{E}_{1res} , $\bar{\Phi}_{1res}$ und \bar{I}_{mres} gegen den Uhrzeigersinn aus der der Abb. 11 entsprechenden Lage in die der Abb. 12 gemäße Lage, wobei sich die Spannung U von $+U$ bis $+U_{max}$ ändert.

Auf diese Weise zeigt sich, daß sogar unbedeutende Größen der Stator-durchflutungen $\pm\Delta\theta'$ mit Hilfe der durch sie hervorgerufenen Momente starke Veränderungen der Größe U verursachen können.

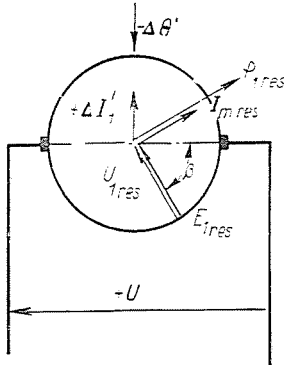


Abb. 9

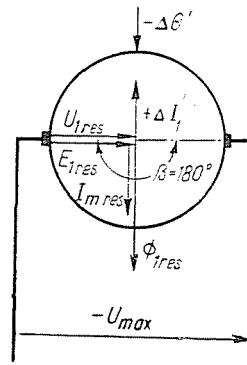


Abb. 10

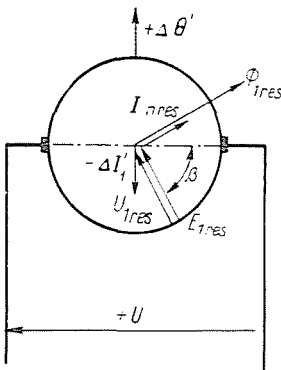


Abb. 11

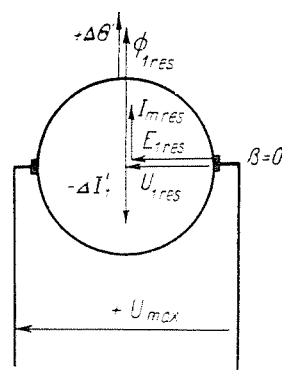


Abb. 12

Demnach stellt das System gemäß Abb. 9 und 11 das Grundschema einer neuen Verstärkermaschine dar, die von den Stator-durchflutungen $\pm\Delta\theta'$ gesteuert wird. Wenn wir die Änderungen der zwischen den Bürsten abgenommenen Gleichspannung auf die erwähnten Steuerdurchflutungen negativ rückkoppeln, d. h. derart, daß die von letzteren hervorgerufenen Steuer-momente $\mp\Delta M$ die erwähnten Spannungsänderungen zu beseitigen trachten, so ist es offenbar möglich, stabil arbeitende Maschinen zu erhalten, die nicht nur die Leistung des Dreiphasenstromes in Gleichstromleistung verwandeln (oder umgekehrt), sondern außerdem die eigenen Parameter oder die anderer

Maschinen je nach dem konkreten Schaltungsschema der Rückkoppelung selbsttätig stabilisieren oder gemäß einer anderen gewünschten Gesetzmäßigkeit regeln.

Bevor wir aber Beispiele der erwähnten Rückkoppelung und der durch sie erzielbaren Betriebseigenschaften der Autodyne zeigen, müssen wir noch einige wichtige Teilprobleme lösen. Sie beziehen sich auf die Frage der Kommutation sowie auf den Strom $I_{m\text{res}}$, von dem wir schon in einem anderen Zusammenhang aufgezeigt haben, daß er die Belastbarkeit des Läufers verringert und den Leistungsfaktor verschlechtert.

3. Die zweckmäßige Ausbildung der magnetischen Kreise der Autodyne

Im Abschnitt 2 wurde angenommen, daß der magnetische Widerstand, den der Erregerfluß zu überwinden hat, bei beliebiger Richtung des letzteren gleichbleibt. Dies würde z. B. dann zutreffen, wenn der Ständer ähnlich ausgeführt wäre, wie in einer Asynchronmaschine.

Eine derartige magnetische Konfiguration würde aber große Kommutationsschwierigkeiten hervorrufen, da der Querfluß Φ_1 durch die Kommutationszone hindurchgehen würde. Ein ähnliches Problem würde sich übrigens auch in bezug auf den Längsfluß Φ'_1 ergeben, da im nächsten Abschnitt auch von der Verwendung von Hilfsbürsten die Rede sein wird, die senkrecht zu den Arbeitsbürsten A und B angeordnet sind.

Aus den aufgezählten Gründen wählen wir eine magnetische Konfiguration, bei der die Maschine gespaltene, diagonal angeordnete Pole besitzt, was zur Folge hat, daß das Magnetsystem einer solchen 2poligen Autodyne wie ein Magnetsystem einer 4poligen Gleichstrommaschine aussieht (Abb. 13).

Da die Maschine nur vier Symmetrieebenen besitzt und daher die von uns bisher vorausgesetzte Gleichmäßigkeit der Leitfähigkeit in allen Richtungen im gegebenen Falle nicht besteht, könnte man im ersten Augenblick vermuten, daß in einer solchen Autodyne ein Reaktionsmoment entstehen muß.

Eine genaue Untersuchung dieser Frage zeigt aber, daß eine derartige Befürchtung unbegründet ist.

Zerlegen wir den Magnetisierungsstrom $\bar{I}_{m\text{res}}$ (Abb. 14) in zwei Komponenten, von denen die eine \bar{I}'_m in der Richtung der Längsachse und die andere \bar{I}_m in der Richtung der Querachse der Maschine wirkt. Das Verhältnis des durch die Durchflutung des Stromes I'_m hervorgerufenen Flusses Φ' (Abb. 13) zum Strom I'_m wird durch die Leitfähigkeit der Maschine in der Richtung der Längsachse bestimmt. Sie ist offenbar gleich der Leitfähigkeit längs der Querachse, die das Verhältnis des Flusses Φ zu jenem Strom I_m bestimmt, durch dessen Durchflutung Φ hervorgerufen wird. Daher ist

$$\frac{I_m}{\Phi} = \frac{I'_m}{\Phi'} = c_3. \quad (14)$$

Andererseits ist

$$\frac{\Phi}{\Phi_1} = \frac{\Phi'}{\Phi'_1} = c_4, \quad (15)$$

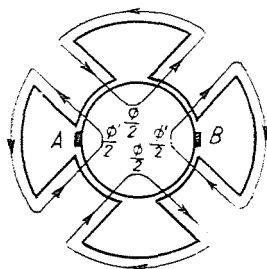


Abb. 13

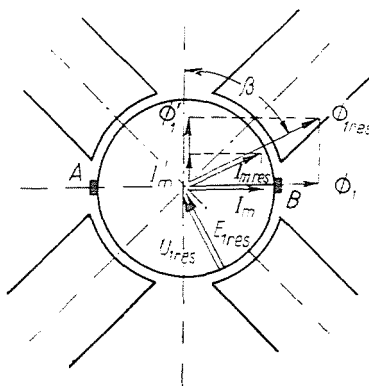


Abb. 14

wobei c_4 konstant ist und c_3 vorläufig als konstant angenommen wird.

Daher ist den Formeln (1), (2), (14) und (15) gemäß

$$\frac{I_m}{I'_m} = \frac{\Phi_1}{\Phi'_1} = \operatorname{tg} \beta. \quad (16)$$

Daraus folgt, wie Abb. 14 zeigt, daß der Vektor des Stromes $\bar{I}_{m\ res}$ bei beliebigem Winkel β der Richtung nach mit dem Vektor $\bar{\Phi}_{1\ res}$ zusammenfällt, d. h. senkrecht zum Vektor $\bar{E}_{1\ res}$ liegt und daher keine Wirkkomponente enthält, ohne die kein Reaktionsmoment entstehen kann.

Trotzdem im gegebenen Fall die magnetische Konfiguration in verschiedenen Richtungen nicht gleich ist, zeigt sich, daß in der nach Abb. 13 ausgeführten Autodyne dieser Umstand keinen Einfluß auf die oben erhaltenen Resultate hat.

4. Das Problem der schlüpfenden Statordurchflutungen

Das Magnetsystem gemäß Abb. 13 verbessert die Kommutation bedeutend, da die Kommutationszone nunmehr wie in der Gleichstrommaschine zwischen ausgeprägten Polen liegt. Aber noch immer kann die Querkompo-

nente des Magnetisierungsstromes $\bar{I}_{m\ res}$ einen, wenn auch infolge der Pollücke bedeutend geschwächten, durch die Kommutationszone gehenden Querfluß hervorrufen. Wir wollen daher zur Untersuchung der Frage übergehen, ob wir nicht den Strom $\bar{I}_{m\ res}$ überhaupt beseitigen könnten. Hierbei entsteht vor allem folgendes Problem:

Um das indifferente Gleichgewicht des Flusses $\bar{\Phi}_{1\ res}$ zu gewährleisten, haben wir bisher auf die Verwendung der üblichen Statorerregewicklungen des Einankerumformers verzichtet, da sie bestimmte Drehmomente hervorrufen, die die freie Drehung des Flusses erschweren.

Um diese Momente zu beseitigen, wurde (Abb. 8 und 14) ein derartiges System der Rotorerregung verwirklicht, bei welchem die durch den Rotorstrom $\bar{I}_{m\ res}$ erzeugte Durchflutung der Erregung beim Schlüpfen des Rotors und des Flusses $\bar{\Phi}_{1\ res}$ zusammen mit $\bar{\Phi}_{1\ res}$ schlüpft. Diese Art der Erregung, die man »schlüpfende Rotorerregung« nennen könnte, hat aber eben jenen Mangel zur Folge, den wir nunmehr beseitigen möchten, nämlich die Entstehung des Stromes $I_{m\ res}$. Deshalb entsteht die Frage, ob man nicht dasselbe Ziel — zu dessen Erreichung wir auf die Erregerwicklung verzichtet haben — und zwar die Befreiung des Ankers von dem auf ihn wirkenden, durch diese Wicklung hervorgerufenen Drehmoment auf einem anderen Weg ohne Schaffung eines Rotorerregerstromes erreichen kann.

Dieses Problem fand seine Lösung als »Wicklungssystem der schlüpfenden Statorerregung«, welches die bei der Änderung der Richtung des Flusses $\bar{\Phi}_{1\ res}$ notwendige neue Verteilung der Statordurchflutung selbsttätig ohne Schaffung eines Drehmomentes gewährleistet.

Zur Entwicklung des erwähnten Systems von Statorwicklungen ist es zweckmäßig, von der oben beschriebenen Erscheinung der Kompensationsströme auszugehen, d. h. man muß zu der erwähnten Durchflutung der Erregung, welche durch den Rotorstrom $\bar{I}_{m\ res}$ hervorgerufen wird, auf dem Stator eine Durchflutung hinzufügen, die bei einem beliebigen Winkel β im Rotor einen Kompensationsstrom hervorrufft, der gleich und entgegengesetzt dem Strom $\bar{I}_{m\ res}$ ist.

Untersuchen wir diese Frage für eine Autodyne, welche die in der Abb. 13 gezeigte Konfiguration besitzt. Hierbei gehen wir von den Formeln (1), (2), (6), (7), (14) und (15) aus, aus denen folgt, daß, wenn wir das konstante Verhältnis

$$\frac{E_{1\ res}}{\Phi_{1\ res}} = c_5 \text{ nennen, folgende Beziehungen gelten:} \quad (17)$$

$$I_m = c_3 c_4 \Phi_{1\ res} \sin \beta = \frac{c_3 c_4}{c_5} E_{1\ res} \sin \beta = \frac{c_3 c_4}{c_5} E'_1 \quad (18)$$

und

$$I'_m = c_3 c_4 \Phi_{1\text{res}} \cos \beta = \frac{c_3 c_4}{c_5} E_1. \quad (19)$$

Die gestellte Aufgabe wird gelöst sein, wenn wir der Längs- und Querachse entlang Statordurchflutungen Θ'_e und Θ_e von solcher Größe erzeugen, daß der von Θ'_e hervorgerufene Kompensationsstrom gleich I'_m sei, während der von Θ_e hervorgerufene Kompensationsstrom gleich I_m sei. Analog zur Formel (13) ist es zur Erreichung eines solchen Effektes nötig, daß die Größen dieser Durchflutungen gleich sein mögen

$$\Theta'_e = \frac{I'_m}{c_2} = \frac{c_3 c_4}{c_2 c_5} \cdot E_1 \quad (20)$$

und

$$\Theta_e = \frac{I_m}{c_2} = \frac{c_3 c_4}{c_2 c_5} \cdot E'_1. \quad (21)$$

Daraus folgt, daß die Aufgabe der Schaffung eines Systems von Wicklungen der schlüpfenden Statorerregung gelöst sein wird, wenn es uns gelingt, den Strom I'_e (Abb. 2a) proportional zu E_1 und den Strom I_e proportional zu E'_1 zu machen.

Wenn wir in Betracht ziehen, daß laut Formel (8) $E_1 = \frac{E}{c_1}$, so ergibt sich, daß zur Schaffung der notwendigen Durchflutung Θ'_e genügt, den Strom I'_e mit Hilfe der zwischen den Bürsten *A* und *B* erhaltenen Spannung zu erzeugen.

In diesem Falle ist die Durchflutung Θ'_e gleich

$$\Theta'_e = c_6 \cdot E = c_6 c_1 E_1, \quad (22)$$

wobei c_6 eine Konstante ist.

Wenn man die Konstanten derart auswählt, daß

$$c_6 \cdot c_1 = \frac{c_3 c_4}{c_2 c_5} \quad (23)$$

sei, so gewährleistet die Durchflutung Θ'_e das Verschwinden des Stromes I'_m [Formel (20)].

Die innere Spannung E'_1 bleibt bei der von uns angenommenen Lage des Flusses $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ im Diagramm der zeitlichen Vektoren (Abb. 2b) um 90° hinter

E_1 zurück. Daraus folgt: Wenn der inneren Spannung E_1 , die vom Fluß Φ_1' in der Phasenwicklung induziert wird, auf der Gleichstromseite die innere Spannung $E = c_1 E_1$ entspricht, welche längs der Achse der Bürsten A und B wirkt, so entspricht der inneren Spannung E_1' auf der Gleichstromseite die innere Spannung $E' = c_1 E_1'$, die längs der zur Achse der Bürsten A und B senkrechten Achse wirkt. Wenn wir auf diese Achse für einen kleinen Erregerstrom berechnete Hilfsbürsten C und D anordnen und von diesen Bürsten eine Wicklung speisen, welche vom Strom I_e durchflossen wird und denselben Querschnitt und dieselbe Windungszahl besitzt wie die Wicklung, welche vom Strom I_e' durchflossen wird, so wird die in ihr hervorgerufene Durchflutung gleich

$$\Theta_e = c_6 \cdot E' = c_6 \cdot c_1 E_1' = \frac{c_3 c_4}{c_2 c_5} \cdot E_1' \quad (24)$$

sein, d. h. sie wird eine Größe haben, die das Verschwinden des Stromes I_m gewährleistet [Formel (21)].

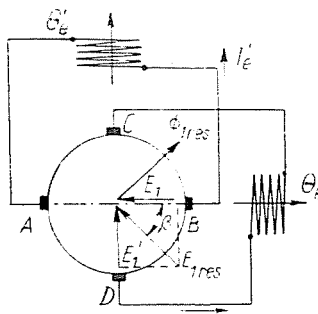


Abb. 15/a

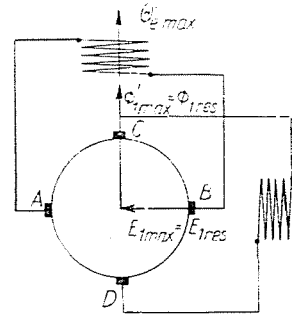


Abb. 15/b

Auf diese Weise erhalten wir (Abb. 15a) das gesuchte System der Statorwicklungen der schlüpfenden Erregung, welche bei beliebiger Lage des Flusses $\bar{\Phi}_{1, res}$ jene Durchflutung des Stators gewährleistet, die zur Erzeugung der Flüsse Φ' und $\bar{\Phi}$ notwendig ist. Abb. 15b zeigt dasselbe Schaltungsschema für den Fall, daß $\beta = 0$ und $E_1 = E_{1, max} = E_{1, res}$. Hierbei hat die innere Spannung E , welche zwischen den Bürsten A und B wirkt, die Größe E_{max} und ruft die Durchflutung $\Theta_e'_{max}$ hervor. Andererseits ist $E_1' = 0$, $E' = 0$ und deshalb die Durchflutung $\Theta_e = 0$. Auf diese Weise wirkt die Durchflutung nur der Längsachse entlang, was der Lage des Flusses $\bar{\Phi}_{1, res}$ entspricht. Hierbei entspricht die maximale Größe $\Theta_e'_{max}$ dem Umstand, daß auch Φ_1' die maximale Größe $\Phi_{1, max} = \Phi_{1, res}$ hat.

Abb. 15c zeigt die geänderte Verteilung der Statordurchflutung für den Fall, daß $\beta = 90^\circ$.

Die Hinzufügung des Systems von Statorwicklungen (Abb. 15a), welches den Rotor vollständig vom magnetisierenden Strom entlastet, ruft praktisch kein Drehmoment hervor, was man leicht auf Grund folgender Überlegungen beweisen kann.

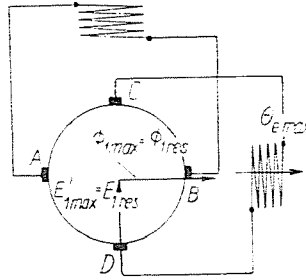


Abb. 15/c

Der durch die Durchflutung Θ'_e bewirkte Kompensationsstrom $c_2 \Theta'_e$ erzeugt die Generatorleistung $3c_2 \cdot E'_{1res} \cdot \Theta'_e \sin \beta$, die, wenn wir die Formeln (20) und (6) in Betracht ziehen, gleich ist :

$$3 \frac{c_3 c_4}{2 c_5} \cdot E_{1res}^2 \cdot \sin 2\beta.$$

Der Kompensationsstrom $c_2 \Theta_e$ ergibt laut Formeln (21) und (7) die Motorleistung

$$3 c_2 E_{1res} \Theta_e \cos \beta = 3 \frac{c_3 c_4}{2 c_5} E_{1res}^2 \cdot \sin 2\beta.$$

Auf diese Weise ist die Gesamtleistung gleich 0, d. h. die Hinzufügung des in Abb. 15 dargestellten Wicklungssystems der schlüpfenden Statorerregung ruft kein Drehmoment hervor und stört nicht — im Gegensatz zur Erregerwicklung des Einankerumformers — den Zustand des indifferenten Gleichgewichts des Flusses $\bar{\Phi}_{1res}$.

Die weiteren Untersuchungen haben gezeigt, daß man denselben Effekt einfacher und wirtschaftlicher auf Grund des Schemas in Abb. 16 erhalten kann. In diesem Schema ist nur eine Hilfsbürste C vorgesehen. Die Pfeile im Anker zeigen die Richtung der Wirkung der induzierten Spannungen E und E' .

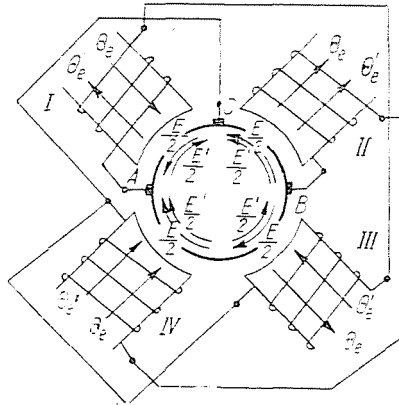


Abb. 16

Offenbar entsteht zwischen den Bürsten A und C die innere Spannung $\frac{E-E'}{2}$ und zwischen den Bürsten C und B die Spannung $\frac{E+E'}{2}$. Die Spannung $\frac{E-E'}{2}$ speist die sich auf den Halbpolen I und III befindenden Wicklungen, während die Spannung $\frac{E+E'}{2}$ die auf den Halbpolen II und IV befindlichen Wicklungen speist.

Auf Grund der obigen Erläuterungen ist es ohne weiteres klar, daß auch das Wicklungssystem gemäß Abb. 16 bei beliebigem Winkel β keinerlei inneres Drehmoment erzeugt. Außerdem vermögen wir auch folgendes Problem zu lösen:

Bisher haben wir die Wirkung des Reibungsmomentes vernachlässigt, während es doch in Wirklichkeit besteht und den Rotor zu verzögern sucht. Wir können aber seine Wirkung folgendermaßen kompensieren:

Wir haben die Wirkung der schlüpfenden Statorerregung damit erklärt, daß wir dem Strom $\bar{I}_{m\ res}$ im System gemäß Abb. 9 und 11 einen konstanten Kompensationsstrom superponieren, den wir mit Hilfe der Wicklungen der Abb. 15 oder 16 erzeugen und der gleich groß und ihm entgegengesetzt ist, also der Spannung $\bar{U}_{1\ res}$ um 90° voreilt. Stellen wir uns nunmehr z. B. ein Wicklungssystem vor, welches an die Bürsten A , B und C genau so angeschlossen ist, wie es Abb. 16 zeigt, wobei aber jede Spule auf dem im Uhrzeigersinn folgenden Halbpole liegt (Abb. 17), so dreht sich offenbar demgemäß auch der

Da der Belastungswechselstrom I_1 ein durch die Durchflutung θ_G des Belastungsgleichstromes I hervorgerufener Kompensationsstrom ist (Abb. 18), wird der Einfluß der resultierenden Durchflutung $\theta_G - \theta_1$ dieser beiden Ströme sehr klein sein. Die durch den Strom I erzeugte Reaktanzspannung e_r wird teilweise durch die vom Strom I_1 induzierte Reaktanzspannung

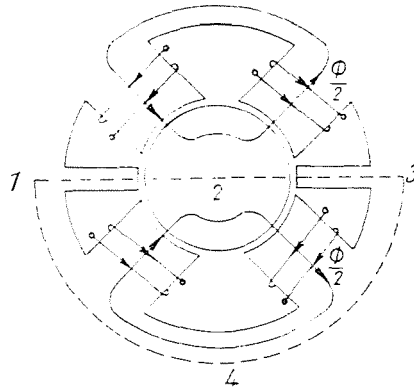


Abb. 19

kompensiert. Die resultierende Reaktanzspannung und den Einfluß des übrigbleibenden nicht kompensierten Teiles der Ankerdurchflutung auf die Stromwendezone kann man mit Hilfe einer vom Strom I durchflossenen Wendepolwicklung beseitigen, da I_1 und I einander proportional sind.

Den Einfluß der Schwankungen der Durchflutung des Stromes I_1 auf die Stromwendung, die ungefähr $\pm 7\%$ betragen und eine Frequenz $2mf$ besitzen (wobei m die Anzahl der Phasen ist), kann man mit Hilfe der Vergrößerung des Luftspaltes unter den Wendepolen leicht bis zu einem unschädlichen Wert verkleinern.

Untersuchen wir, welchen Einfluß der Querfluß Φ auf die Stromwendung ausübt, wenn die Autodyne die Konfiguration der Abb. 13 gemäß besitzt.

Da die Erregerwicklungen die Wendezone nicht umfassen, sondern nur die bezüglichen Halbpole, so geht der Fluß Φ in Form von zwei gleichen Zweigen (Abb. 19) an der Wendezone und den Wendepolen vorüber. Hierbei ist die Summe der durch das System der Statorerregung innerhalb der Kontur 1—2—3—4—1 hervorgerufenen Durchflutungen gleich Null. Andererseits liquidiert dieses System, wie wir bereits wissen, den Strom $I_{m\ res}$ im Anker. Infolgedessen geht nicht einmal ein Teil des Erregerflusses durch den unter den Wendepolen befindlichen Luftspalt hindurch.

Gehen wir jetzt zur Untersuchung der Frage über, wie die dynamische Stromwendung in der Autodyne verläuft. Um zu verstehen, warum in der Autodyne dieses Problem vollständig gelöst ist, während es im Einankerumfor-

mer große Schwierigkeiten hervorruft, wollen wir kurz untersuchen, worin das Problem besteht.

Wie bekannt, entstehen im Einankerumformer bei der Stoßbelastung Stromwendungsschwierigkeiten, da die Änderung des Stromes I_1 und seiner Durchflutung Θ_1 hinter den Änderungen des Stromes I und seiner Durchflutung Θ_G (Abb. 18) zurückbleibt. Zum Beispiel, wenn Θ_G nach dem Gesetz $\Theta_G = f(t)$ wächst, so ist $\Theta_1 \approx \lambda' \cdot f(t)$, wobei $\lambda' < 1$. Infolgedessen entstehen Restdurchflutungen von der Größe $(1 - \lambda') \cdot f(t)$, deren Fluß in den kurzgeschlossenen Windungen große Spannungen induziert und außerdem ein bedeutendes Drehmoment hervorruft, das Schwingungen des Ankers zur Folge hat.

Die Ursache für diese Erscheinung ist die von uns bisher vernachlässigte Tatsache, daß bei der Belastung eines Einankerumformers in ihm die Oberwellen des Flusses Φ' sowie der vom Strome I im Rotor erzeugten Querdurchflutung ein inneres elektrodynamisches Bremsmoment erzeugen.

Es läßt sich beweisen, daß dieses Bremsmoment dem Produkt $I \cdot E_{1\text{ res}} \cdot \cos \beta$ proportional ist. Dieser Beweis ginge aber über den Rahmen dieser Arbeit weit hinaus.

Bei plötzlichem Anwachsen des Belastungsstromes wird der Läufer durch das Anwachsen des erwähnten Momentes stark verzögert. Infolgedessen beginnt sich sowohl im Falle des gewöhnlichen Einankerumformers als auch bei der Anordnung gemäß Abb. 2 der Vektor $\bar{U}_{1\text{ res}}$ zu drehen, während der Vektor $\bar{E}_{1\text{ res}}$, der senkrecht zu der Achse der Statorerregerdurchflutung ist, unbeweglich bleibt. Im Zusammenhang damit entstehen starke Ausgleichsströme, deren Querkomponente einen durch die Kommutationszone hindurchgehenden Fluß erzeugt. Außerdem beginnt der Läufer zu pendeln.

In der Autodyne haben wir prinzipiell ganz andere Verhältnisse, da im Falle einer Verzögerung des Läufers sich nicht nur der Vektor $\bar{U}_{1\text{ res}}$, sondern auch der Vektor $\bar{E}_{1\text{ res}}$ gleichzeitig mit ihm dreht, da ja letzterer nicht mehr durch einen im Raum feststehenden, sondern durch einen sich selbsttätig mit dem Vektor $\bar{U}_{1\text{ res}}$ mitdrehenden Erregerfluß $\bar{\Phi}_{1\text{ res}}$ induziert wird. In der Autodyne können daher die oben erwähnten, die Stromwendung störenden Ausgleichsströme nicht auftreten. Außerdem besteht im Falle der Autodyne auch die prinzipielle Möglichkeit, die Wirkung des obenerwähnten, dem Produkt $I \cdot E_{1\text{ res}} \cdot \cos \beta$ proportionalen Drehmomentes vollständig zu beseitigen. Dazu ist nur notwendig, in der Querachse des Stators einige vom Strom I durchflossene Windungen anzubringen, und zwar derart, daß die entstehende Durchflutung Θ_{GZ} mit der Richtung von Θ_G (Abb. 18) zusammenfallen möge.

Dann erzeugt offenbar diese Wicklung einen, dem Strom I proportionalen Kompensationsstrom, der mit dem Vektor \bar{E}_1 in bezug auf Richtung zusammenfällt und daher eine Motorleistung erzeugt, die proportional dem Produkt $I \cdot E_{1\text{ res}} \cdot \cos \beta$ und daher bei geeigneter Bemessung der erwähnten Wicklung

ten und dabei stufenlos regelbaren Sollwert stabilisiert, unabhängig von der Größe des äußeren Lastwiderstandes.

Zu diesem Zweck koppeln wir die Spannung U dadurch auf die Steuerdurchflutung $\pm \Delta \Theta'$ zurück, daß wir diese als Differenz zweier, auf dem Ständer hervorgerufener, gleich großer und einander entgegengesetzter Durchflutungen erzeugen, von denen die eine durch den von der Spannung abhängigen Belastungsstrom und die andere durch einen konstanten, aber regelbaren Strom i_s gebildet ist. In diesem Falle ergibt sich, daß die Autodyne selbsttätig auf das Gesetz

$$I = i_s \cdot \frac{w'_s}{w'} \quad (25)$$

regelt, wobei w'_s die Windungszahl der von i_s und w' die Windungszahl der von I durchflossenen Wicklung ist.

Dies wird auf Grund folgender Überlegungen klar. Wenn nur die Durchflutung $i_s w'_s$ existieren würde, so würde sie einen Kompensationsstrom $c_3 i_s w'_s$ hervorrufen, welcher zusammen mit der Spannung $E_{1\text{ res}}$ die Generatorleistung

$$3 E_{1\text{ res}} c_2 \cdot i_s w'_s \cdot \sin \beta$$

ergeben würde.

Analog würde die Durchflutung $I \cdot w'$ eine Generatorleistung

$$3 E_{1\text{ res}} c_2 \cdot I w' \cdot \sin \beta$$

ergeben.

In stationärem Zustand, wenn $n = n_s$, muß die algebraische Summe aller Leistungen und der betreffenden Momente gleich Null sein, und die Leistung des Stromes $c_3 i_s w'_s$ gleich der Leistung des Stromes $c_2 I w'$. Auf diese Weise erhalten wir die Gleichung

$$(i_s w'_s - I \cdot w') \cdot \sin \beta = 0. \quad (26)$$

Dabei nehmen wir an, daß auf den Anker keinerlei innere Momente wirken, d. h. die Generatorleistung des Stromes I und das durch ihn hervorgerufene Bremsmoment sind der Motorleistung und dem entsprechenden Beschleunigungsmoment genau gleich, die durch den Phasenstrom I_1 verursacht sind. Letzterer kompensiert in der Ankerwicklung die magnetische Wirkung des Stromes I .

Wenn wir den Einzelfall ausschließen, bei dem $\beta = 0$, d. h. weder die Durchflutung $i_s w'_s$ noch die Durchflutung $I w'$ eine aktive Leistung oder das entsprechende Drehmoment hervorrufen, so hat die Gleichung (26) die in der Formel (25) dargestellte Lösung. In diesem Fall regelt die Autodyne in

Wirklichkeit so, daß der Unterschied zwischen den erwähnten Durchflutungen verschwindet, d. h. dem Gesetz gemäß :

$$\pm \Delta\theta' = 0. \quad (27)$$

Solcherart wird der Strom I auf den Sollwert $i_s \frac{w'_s}{w'}$ geregelt, und zwar bei beliebiger Größe des Belastungswiderstandes R_B , die kleiner ist als $\frac{U_{\max} \cdot w'}{i_s \cdot w'_s}$, darunter auch für den Fall $R_B = 0$, d. h. für den Fall des Kurz-

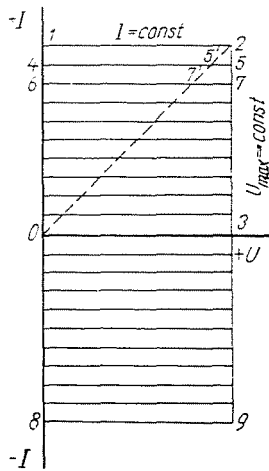


Abb. 21

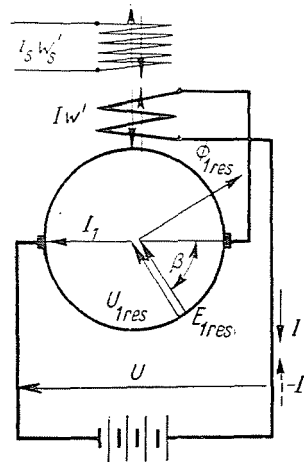


Abb. 22

schlusses, indem $U = 0$. Bei Vergrößerung des Widerstandes R_B bis zum gezeigten Grenzwert erhöht sich die Spannung U automatisch bis U_{\max} . Dabei verkleinert sich β bis 0, wonach die Autodyne im gegebenen Schema ihre Regelfähigkeit verliert. Wenn R_B sich weiter vergrößert und der Strom I sich verkleinert, kann die dabei entstehende Durchflutung $i_s w'_s - I w'$ nicht mehr regeln, da bei $\beta = 0$ der Kompensationswechselstrom $c_2(i_s w'_s - I w')$ schon keine aktive Leistung mehr hat und kein Drehmoment hervorruft. Hierbei wirkt $\bar{\Phi}_{1,es}$ in der Richtung der Längsachse und die Autodyne verwandelt sich in einen gewöhnlichen Einankerumformer, wobei die Kennlinie $I = \text{konstant}$, d. h. die Gerade 1—2 (Abb. 21) in die Kennlinie $U = U_{\max} = \text{konstant}$ übergeht, d. h. in die Gerade 2—3.

Mit Hilfe der Verkleinerung des Steuerstroms i_s kann man den Strom I vermindern (z. B. anstatt der Geraden 1—2 die Geraden 4—5' oder 6—7' usw. erhalten). Bei entsprechender Vergrößerung des Widerstandes R_B kann

man die erwähnten Geraden bis zu den Punkten 5, 7 verlängern usw. Wenn $i_s = 0$, verkleinert sich der Strom I sogar bei Kurzschluß bis Null (Punkt 0).

Wenn wir den Widerstand R_B durch eine Akkumulatorenbatterie laut Abb. 22 ersetzen, so garantiert die Autodyne die Konstanz des Ladestroms I , während sich die Spannung U selbsttätig im Prozeß der Ladung vergrößert. Bei Erreichung des Grenzwertes $U = U_{\max}$ verkleinert sich der Strom der Batterie bis Null (die Gerade 2—3 in Abb. 21). Die Größe des Ladestroms hängt innerhalb der Grenzen $0 < U < U_{\max}$ nicht von U ab, d. h. dieselbe Autodyne kann Batterien laden, die gänzlich verschiedene Spannungen besitzen. Den Ladestrom I kann man verkleinern, wenn man den Strom i_s bis Null verkleinert (z. B. die Kennlinien 4—5, 6—7 und 0—3). Bei Umschaltung der Richtung des Stromes i_s und Änderung der Richtung seiner Durchflutung $i_s w'_s$ (der entsprechende Pfeil in Abb. 22 ist punktiert ausgeführt) ruft die im ersten Augenblick entstehende Durchflutung — ($i_s w'_s + I w'$) ein beschleunigendes Drehmoment hervor, unter dessen Einfluß der Vektor $\bar{E}_{1\text{ res}}$ sich weiter im Uhrzeigersinne dreht und durch eine solche Lage hindurchgeht, bei der die Spannung E der Autodyne gleich ist der Spannung der Akkumulatorenbatterie. Hierbei nimmt die Größe des Stromes I bis zum Wert 0 ab. Die im Stator wirkende Durchflutung hat noch die Größe $i_s w'_s$ und ruft daher eine weitere Drehung des Vektors $\bar{E}_{1\text{ res}}$ im Uhrzeigersinn hervor. Infolgedessen wird die Spannung E der Autodyne kleiner als die Spannung der Batterie. Dabei ändern der Strom I und die Durchflutung $I w'$ ihre Richtung (punktierte Zeiger), und der Strom wächst bis zur Größe $-i_s \frac{w'_s}{w'}$ (z. B. entsprechend der Geraden 8—9 in Abb. 21), bei der die Wirkung der Durchflutung des Stromes i_s mit Hilfe der abermals ihr entgegengesetzten Durchflutung des Stromes I vollkommen aufgehoben wird. Auf diese Weise gewährleistet die Autodyne jetzt die Entladung der Batterie bei konstanter Größe des Entladungstromes. Die Maschine verwandelt sich aus einem den Wechselstrom in Gleichstrom umwandelnden Umformer in einen Gleichstrom in Wechselstrom umwandelnden Umformer, d. h. sie gibt die von der Batterie erhaltene elektrische Energie ins Netz zurück. Auf diesem Wege ist es möglich, die Formierung der Batterie ohne Rheostat durchzuführen.

Wenn man die Batterie durch einen Gleichstrommotor mit Fremderregung ersetzt, wird der letztere eine Exkavator Kennlinie haben (Abb. 23), da bei Strömen, die kleiner sind als $i_s \frac{w'_s}{w'}$ die Autodyne wie ein gewöhnlicher Einankerumformer arbeitet, d. h. bei $U \approx U_{\max}$, was zur Folge hat, daß der Motor ungefähr mit $n \approx$ konstant arbeiten wird. Bei Vergrößerung des Stromes I bis zur erwähnten Grenze verwandelt sich der Einankerumformer in eine Autodyne, die gemäß der Kennlinie $I =$ konstant, d. h. $M =$ konstant arbeitet. Der Sollwert der Stabilisierung der Drehzahl n kann durch den Erre-

gerstrom des Motors geregelt werden, der Sollwert der Stabilisierung des Drehmomentes M aber durch Änderung des Stromes i_s der Steuerwicklung der Autodyne.

Besonders effektiv kann die Schaltung verwendet werden, die Abb. 24 zeigt. In diesem Falle sind mehrere Gleichstrommotoren in Reihe geschaltet und erhalten von einer Autodyne ihren, auf einen beliebigen Sollwert einstell-

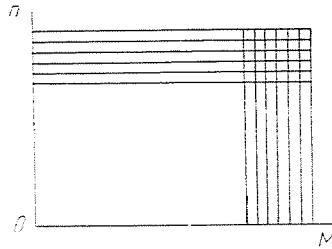


Abb. 23

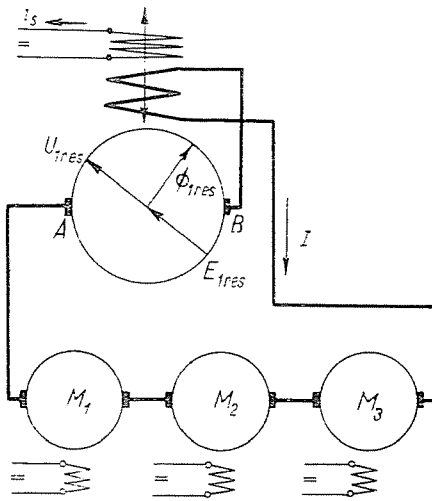


Abb. 24

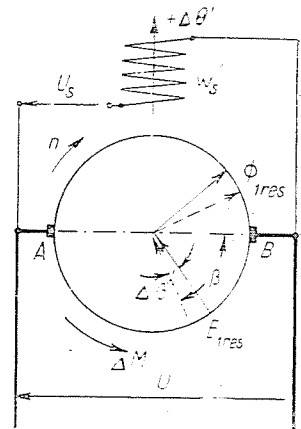


Abb. 25

baren Strom. Das Drehmoment der einzelnen Motoren kann mit Hilfe der einzelnen Erregerwicklungen eingestellt werden.

Bisher wurden Beispiele gezeigt, in denen eine Größe $\Pi_1 = Iw'$ automatisch der Größe $\Pi_2 = i_s w'_s$ gemäß geregelt wird. Dabei wurde der Vergleich dieser Werte untereinander mit Hilfe zweier Regelwicklungen durchgeführt. Aber der einfachste Fall der einachsigen Regelung der Autodyne ist die Ausnutzung einer einzigen Regel-(Steuer-)Wicklung w'_s .

Im Zusammenhang damit untersuchen wir mehrere Beispiele. Abb. 25 zeigt ein Beispiel der Verwirklichung des obengezeigten Prinzips, wo als

Größe U die Spannung U der Autodyne dient und als Größe U_s die Sollspannung U_s . Im gegebenen Falle ist die Wicklung w'_s unmittelbar an die Differenz dieser zwei Werte geschaltet. Nehmen wir an, daß die Vektoren $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ und $\bar{E}_{1\text{res}}$ eine Lage einnehmen, bei welcher

$$U = U_s \quad (28)$$

ist, d. h. $\Delta\theta' = 0$. Dann dreht sich der Anker wegen des Fehlens eines Momentes ΔM synchron und $\Delta\beta = 0$.

Man kann drei prinzipielle Fälle der Störung des stationären Betriebszustandes unterscheiden.

1. Der Anker ändert seine Geschwindigkeit, vergrößert sie z. B. um die Größe Δn . Dabei drehen sich die Vektoren $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ und $\bar{E}_{1\text{res}}$ um den Winkel $\Delta\beta$ im Uhrzeigersinn in die punktiert gezeigte Lage. Die Spannung U verkleinert sich um ΔU , was zur Folge hat, daß in der Wicklung w'_s eine nach oben gerichtete Durchflutung erzeugt wird, welche das synchronisierende, den Anker verlangsamende Moment ΔM hervorruft.

2. Die Größe U ändert ihren Wert z. B. deshalb, weil sich die Spannung $U_{1\text{res}}$ der Wechselstromseite um die Größe $\Delta U_{1\text{res}}$ und daher auch $E_{1\text{res}}$ um die Größe $\Delta E_{1\text{res}}$ verkleinert hat. Dann verringert sich U um die Größe $\Delta U = c_1 \Delta E_{1\text{res}} \cdot \cos \beta$. Da U_s einen unveränderlichen Wert hat, wird jetzt die Wicklung w'_s von der Spannung ΔU gespeist werden. Wie im ersten Fall ruft die nach oben gerichtete Durchflutung $\Delta\theta'$ ein Verzögerungsmoment ΔM hervor. Infolgedessen dreht sich der Vektor $\bar{E}_{1\text{res}}$ gegen den Uhrzeigersinn aus der punktiert gezeigten Lage in die mit Hilfe eines voll ausgeführten Pfeiles bezeichnete Lage, wobei er die neue stationäre Lage dort einnimmt, wo die Spannung U ihre frühere Größe erreicht.

Es ist klar, daß eine ähnliche Stabilisierung auch dann eintritt, wenn sich U aus einem beliebigen anderen Grund ändert (beispielsweise wegen des Spannungsabfalles im Anker bei Belastung).

3. Wenn wir die Größe der Sollspannung U_s ändern, z. B. sie um ΔU_s erhöhen, so entsteht wieder ein nach oben gerichteter Impuls $\Delta\theta'$ der Durchflutung. Analog zum zweiten Fall drehen sich die Vektoren $\bar{\Phi}_{1\text{res}}$ und $\bar{E}_{1\text{res}}$ um den Winkel $\Delta\beta$ gegen den Uhrzeigersinn, wobei sich die Spannung U solange vergrößern wird, bis sie den neuen Wert $U + \Delta U = U_s + \Delta U_s$ erreicht.

Auf diese Weise ist die Autodyne die Quelle einer stabilisierten Spannung, unabhängig von beliebigen Faktoren, wie beispielsweise der Änderung der Belastung, der Spannung oder der Frequenz des Wechselstroms, wobei man die Größe der zu stabilisierenden Spannung stufenlos ändern kann.

In Abb. 26 sind die prinzipiellen Kennlinien $U = f(I)$ dieser Maschine in Form von zur Abszissenachse parallelen Geraden gezeigt.

Die Autodyne mit einer solchen Kennlinie kann mit Erfolg überall dort angewandt werden, wo die selbsttätige Stabilisierung der Spannung U auf einen gegebenen, stufenlos regelbaren Sollwert erwünscht ist.

Wenn man mit der oben erwähnten Autodyne einen Gleichstrommotor speist, so kann der verlustlose Anlauf des Motors mit Hilfe der Vergrößerung der Steuerspannung U_s von 0 bis $U_{s\max}$ leicht verwirklicht werden. Wenn man die Größe U_s ändert, so kann man stufenlos die Drehzahl des Motors regeln. Bei genügend schneller Verkleinerung der Größe U_s ändert sich die Richtung des Motorstroms und die Maschine ergibt Nutzbremmung, wobei die Autodyne den Gleichstrom in Wechselstrom umformt. Infolgedessen kann man die Auto-

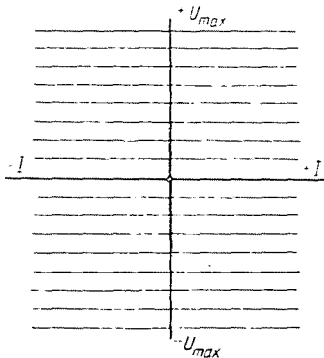


Abb. 26

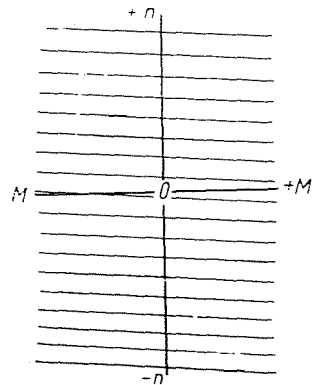


Abb. 27

dyne mit Erfolg auf jenen Gebieten des elektrischen Antriebes anwenden, in denen bisher zur Speisung von Gleichstrommotoren Motorgeneratoren verwendet wurden.

Als mechanische Kennlinien $n = f(M)$ des von der Autodyne gespeisten Motors erhalten wir Gerade (Abb. 27), welche wegen des Spannungsabfalles im Motor eine kleine Neigung haben.

Die Größe Π_1 , die mit der Größe Π_2 verglichen wird, kann auch die algebraische Summe einiger Größen Π'_1, Π''_1 usw. darstellen. Zum Beispiel ist es möglich, bei der Speisung des Motors von der Autodyne nicht die Spannung der Autodyne U auf Konstanz zu regeln, sondern die Größe $U - KI$, wobei K konstant ist. Infolgedessen verkleinert sich die Neigung der Geraden (Abb. 27).

Zu diesem Zweck muß man die Wicklung w'_s mit den Punkten a und c vereinigen (Abb. 28). Wenn das Verhältnis der Spannung, die zwischen den Punkten a und b wirkt, zur Spannung U gleich λ ist, der Widerstand aber, welcher zwischen den Punkten b und c eingeschaltet ist, gleich r_1 , so bekommen wir das Regelgesetz

$$\lambda U - Ir_1 = U_s, \quad (29)$$

d. h. die Spannung U_a der Autodyne ist gleich

$$U_a = U - Ir_1 = \frac{U_s}{\lambda} + Ir_1 \frac{1 - \lambda}{\lambda}. \quad (30)$$

Auf diese Weise gewinnen wir die Möglichkeit, ein Gesetz zu verwirklichen, wonach $U_a = KI$ konstant ist, wobei

$$K = \frac{r_1}{\lambda} (1 - \lambda). \quad (31)$$

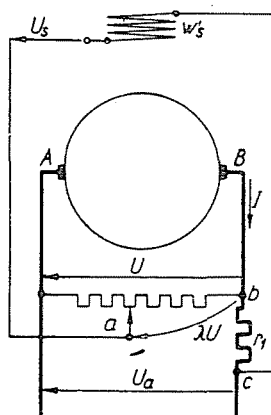


Abb. 28

Die Konstante K kann man leicht durch die entsprechende Wahl des Verhältnisses λ regeln, was zur Folge hat, daß man die Abweichung der Drehzahl des Motors von der konstanten entsprechend verringern kann.

Es ist klar, daß man das Gesetz $\Pi_1 = \Pi_2$ auch in bezug auf jede beliebige andere elektrisch ausdrückbare Größe anwenden kann, obwohl sie keine direkte Beziehung zu der Autodyne hat.

Wenn beispielsweise die Wicklung w'_s (Abb. 25) nicht durch die Differenz $U_s - U$, sondern durch eine Spannung gespeist wird, die der Abweichung der Drehzahl des Motors von der konstanten Größe proportional ist, so wird die Autodyne den Motor derart regeln, daß die Drehzahl konstant bleibt. Wenn die Spannung, welche die Wicklung w'_s speist, der Differenz zwischen der Spannung U_s und der Spannung U_{Gen} des Gleichstromgenerators G (Abb. 29) proportional ist, so wird die als Erregermaschine arbeitende Autodyne A den Erregerstrom des Generators unabhängig von der Belastung oder von der Drehgeschwindigkeit des Generators so regeln, daß $U_{Gen} = U_s$ ist. Nach demselben Prinzip kann die Autodyne als Erregermaschine den Generatorstrom regeln oder die Drehzahl, die Leistung oder den Leistungsfaktor von Motoren usw.

Solcherart kann die Autodyne nicht nur als ein solcher Leistungsumformer arbeiten, der auf seine eigenen Werte und Betriebseigenschaften einwirkt, sondern als selbsttätiger Regler anderer Maschinen oder Maschinengruppen, wobei ein besonderer Vorteil der Autodyne gegenüber andern selbsttätig gesteuerten Erregermaschinen darin besteht, daß sie weder einen speziellen Antriebsmotor verlangt noch auf die Welle der durch sie geregelten Maschine gesetzt werden muß. Außerdem muß folgender wichtiger Umstand besonders unterstrichen werden.

Wie schon erwähnt wurde, haben die Impulse $\pm \Delta\theta'$ eine geringe Größe. Die zu ihrer Entstehung notwendige Leistung ist unvergleichlich klei-

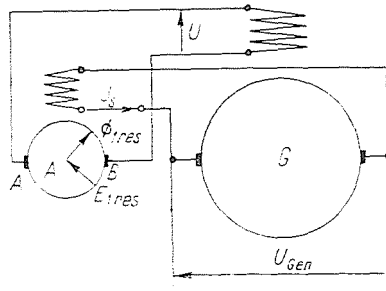


Abb. 29

ner als die zur Erregung der Generatoren angewandte und sehr unbedeutend im Vergleich zur Leistung der Autodyne.

Auf diese Weise stellt die Autodyne eine neue Art einer elektrischen Verstärkermaschine dar, die zu ihrer Drehung keinen Antriebsmotor erfordert.

Es gibt auch derartige Schaltungen, bei denen dieselbe Autodyne auf Wunsch entweder den Strom I oder die Spannung U stabilisiert.

Sie kann hierbei außerdem auf Wunsch einen Pufferbetrieb gewährleisten, bei dem eine Akkumulatorenbatterie einer andern Belastung parallelgeschaltet wird, wobei die Autodyne z. B. die Summe der beiden entstehenden Belastungsströme stabilisiert, so daß die Batterie entweder zusätzliche Leistung abgibt oder überflüssige aufnimmt.

Oben wurden Beispiele für die Verwendung der Autodyne als Regler gewisser Größen in solchen Schaltungsschemas aufgezählt, in denen die Autodyne selbst nur eine kleine Erregerleistung für andere Maschinen erzeugt (z. B. das Schema gemäß Abb. 29) oder selbsttätig arbeitet und die eigenen Parameter regelt. Aber man kann die Autodyne auch als eine solche Maschine verwenden, die mit anderen Maschinen zusammenarbeitet und gewisse Größen regelt, wobei sie gleichzeitig an der Leistungsabgabe der ganzen Maschinen-
gruppe teilnimmt.

Abb. 30 und 31 zeigen als Beispiel die Schemas einer Autodyne, welche in Zu- und Gegenschaltung zur Spannung U_G einer andern, in Form eines Rechteckes gezeigten Gleichstromquelle geschaltet ist.

Nehmen wir beispielsweise an, daß sich die Spannung U_G in den Grenzen von $+U_{\max}$ bis $+U_{\min}$ ändert, während die Stabilisierung der Gesamtspannung $U_a + U_G$ auf den Sollwert

$$U_s = \frac{+U_{\max} + U_{\min}}{2} \tag{32}$$

verlangt wird.

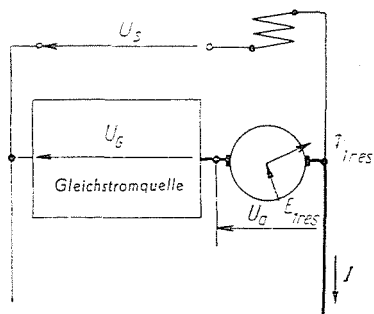


Abb. 30

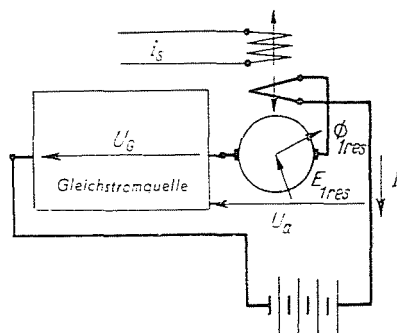


Abb. 31

In diesem Falle kann die Autodyne für die Spannung

$$U_a = \pm \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} \tag{33}$$

ausgeführt werden, wobei sie nach dem Gesetz

$$U_a + U_G = U_s \tag{34}$$

regelt.

Bei der Verkleinerung der Spannung U_G z. B. bis U_{\min} fügt die Autodyne die Spannung $\frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}$ hinzu (Abb. 30), während sie bei der Vergrößerung der Spannung U_G bis U_{\max} umgekehrt die entgegengesetzt gerichtete Spannung $-\frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}$ hinzufügt. Auf diese Weise kann man die Autodyne für eine Leistung bauen, die kleiner ist als die gesamte Leistung der Maschinengruppe, und zwar im Verhältnis $(U_{\max} - U_{\min}) : (U_{\max} + U_{\min})$.

Wenn umgekehrt eine Spannung verlangt wird, welche ihre Größe in breiten Grenzen ändert, während U_G einer derartigen Regelung nicht unter-

worfen werden kann, erzeugt die Autodyne eine Spannung von derselben Richtung, wie U_G oder der ihr entgegengesetzten, wobei sie eine solche Größe hat, bei der sich die Gesamtspannung der Formel (34) gemäß entsprechend der Änderung der Steuerspannung U_s ändert.

Im Schema der Abb. 31 regelt die Autodyne den Strom (beispielsweise einer Akkumulatorbatterie) auf Konstanz mit Hilfe der entsprechenden selbsttätigen Änderung der Spannung U_a , welche in bezug auf Richtung mit der gegebenen Spannung U_G zusammenfällt oder ihr entgegengesetzt ist.

7. Autodynen mit speziellen äußeren Kennlinien

Während die im Abschnitt 6 beschriebenen Autodynen irgendwelche Parameter Π_1 laut einem anderen gegebenen Parameter Π_2 stabilisieren, mögen im folgenden Beispiele solche Autodynen gezeigt werden, bei denen das Schema der Rückkoppelung derart gewählt ist, daß sich das Verhältnis von U und I nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten selbsttätig ändert.

1. Man kann im Schema gemäß Abb. 20, 22 oder 24 den Strom i_s mit Hilfe einer Spannung erzeugen, welche die Differenz zwischen der gegebenen regelbaren Sollspannung U_s und der Istspannung λU darstellt, die zwischen den Punkten a und b des Potentiometerwiderstandes (Abb. 32a) wirkt. Auf diese Weise erhalten wir

$$i_s = \frac{U_s - \lambda \cdot U}{r'_s}, \quad (35)$$

wo r'_s der Widerstand der Wicklung w'_s ist. Dabei entspricht die Kennlinie der Autodyne der Gleichung

$$I = \frac{U_s - \lambda \cdot U}{r'_s \cdot w'_s}. \quad (36)$$

Abb. 32b zeigt die Kennlinien 1, 2, 3, 4, 5, welche sich voneinander durch die Größe λ unterscheiden und die Kennlinien 1', 2', 3', 4', 5', welche sich von den Kennlinien 1, 2, 3, 4, 5 durch die Größe U_s unterscheiden.

2. Es kann im Schema gemäß Abb. 20, 22 oder 24 als Sollwert die der induzierten Spannung E' proportionale Durchflutung der Wicklung fungieren, die zwischen die Zusatzbürsten C und D (Abb. 33) geschaltet ist und in der Richtung der Längsachse liegt.

Laut den Formeln (4), (5), (24) und (7) erhalten wir das Resultat

$$E' = \sqrt{E_{\max}^2 - E^2} \approx U' \approx \sqrt{U_{\max}^2 - U^2}, \quad (37)$$

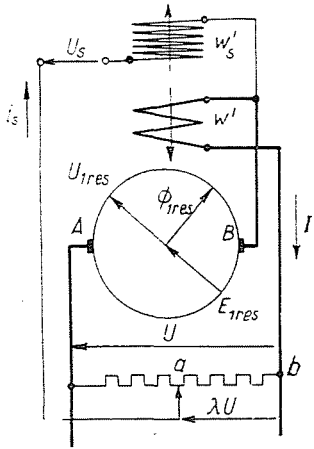


Abb. 32a

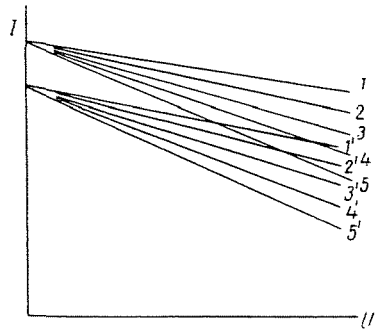


Abb. 32b

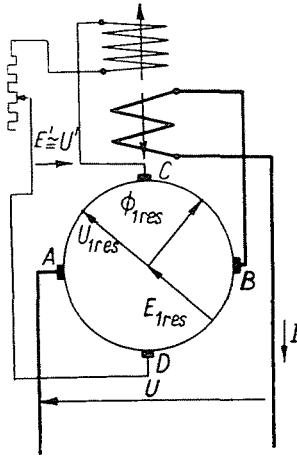


Abb. 33

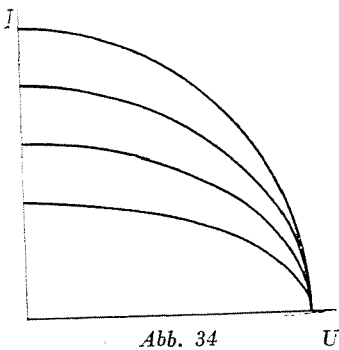


Abb. 34

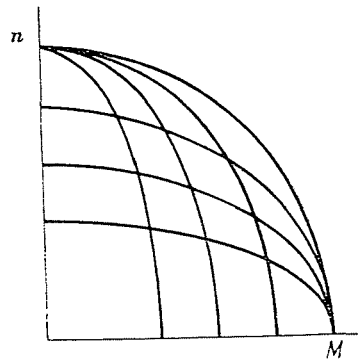


Abb. 35

d. h. die Kennlinie $U' = f(U)$ der eben beschriebenen Autodyne ist kreisförmig.

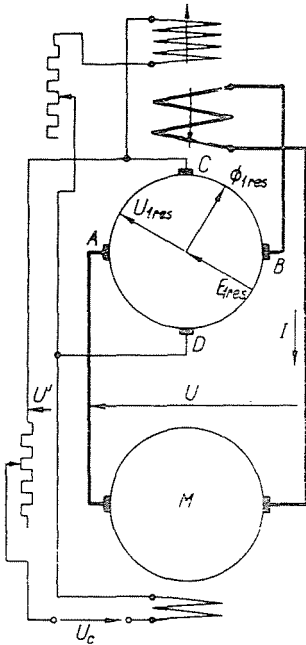


Abb. 36

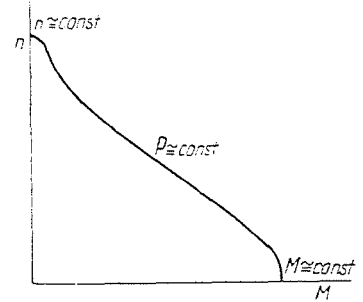


Abb. 37

Da die Durchflutung der im Schema (Abb. 33) von den Bürsten C und D gespeisten Wicklung proportional E' ist, aber die Durchflutung der Reihewicklung ihr gleich sein muß, wird die äußere Kennlinie für den Fall des Schemas gemäß Abb. 33 durch die Gleichung

$$I \sim \sqrt{U_{\max}^2 - U^2}, \quad (38)$$

beschrieben, d. h. durch die Gleichung einer Ellipse, in der die Größe des Maßstabes der Ordinatenachse von der Größe der Proportionalitätskonstanten abhängt (Abb. 34).

Wenn die erwähnte Autodyne einen Gleichstrommotor mit Fremderregung speist, bekommen wir eine Exkavator Kennlinie, wobei die Größe des Momentes (Abb. 35) durch Regelung des Stromes laut Abb. 34 regelbar ist. Die Drehzahl n des Motors wird durch die Änderung seines Erregerstroms geregelt.

Im gegebenen Fall speist die induzierte Spannung E' eine der Regelwicklungen. Indessen kann man E' auch zur Einwirkung auf eine andere mit der Autodyne verbundene Einrichtung verwenden, was weiter die Möglichkeiten der Formänderung der zu erhaltenden Kennlinien vergrößert.

Als Beispiel weisen wir auf die Abb. 36 hin, in welcher die Erregerwicklung des Motors M von der Spannung $U' + U_c$ gespeist wird, wobei U_c eine gegebene Spannung und U' die von den Bürsten C und D der Autodyne erhaltene Spannung ist.

In diesem Falle erhalten wir das Resultat, daß bei kleinen Größen n , d. h. auch bei kleinen Größen U , bei denen $\cos \beta \approx 1$ und daher $U' \approx U'_{\max} = U_{\max} = \text{konstant}$ ist, der Anfangsteil der mechanischen Kennlinie der Ordinatenachse fast parallel bleibt; infolgedessen wird so wie in Abb. 35 bei kleinem n auf $M \approx \text{konstant}$ geregelt (Abb. 37).

Wenn sich die Spannung U vergrößert und U' verkleinert, verringert sich auch der Erregerstrom des Motors, d. h. das Verhältnis des Drehmomentes M zum Strom I verkleinert sich und das Verhältnis der Geschwindigkeit zur Spannung U vergrößert sich. Dabei geht die mechanische Charakteristik allmählich in eine Kurve über, die beiläufig dem Gesetz

$$M \sim \frac{1}{n}, \quad \text{d. h.} \quad P = \text{konstant}$$

folgt (Abb. 37).

Wenn sich die Spannung U der Größe U_{\max} nähert, wird sie praktisch konstant, während sich die Spannung U' bis 0 verkleinert und der Erregerfluß nur durch die Spannung U_c erzeugt wird. Auf diese Weise erhält die Charakteristik die Form entsprechend der Gleichung $n \approx \text{konstant}$ (Abb. 37).

Es gibt viele Beispiele dafür, wie man manchmal mit Hilfe kleiner Veränderungen des Schaltungschemas verschiedene wesentliche Änderungen der Gestalt der Kennlinien und der Eigenschaften der Autodyne erhalten kann.

Die bisher aufgezählten Schaltungschemas der Autodyne sind dadurch gekennzeichnet, daß alle Steuer- und Regelwicklungen in einer Achse angeordnet sind. Noch weitere Varianten von Kennlinien können wir erhalten, wenn wir in den Wicklungssystemen gemäß Abb. 16 oder 17 die Durchflutungen in einer Diagonalrichtung vergrößern und in der andern verkleinern. Weitere mögliche Varianten erhalten wir, wenn wir noch zusätzliche Querwicklungen anordnen. Die Behandlung dieser Fragen ginge aber über den Rahmen dieser Studie weit hinaus.

8. Die Ersparnisse an Elektroenergie in der Autodyne

Da die Autodyne nicht nur eine neuartige Verstärkermaschine ist, sondern vor allem auch ein Leistungsumformer, der offenbar bis zur selben Größenordnung der Leistung beansprucht werden kann wie der Einankerumformer, ist beim Vergleich mit andern möglichen Lösungen die Tatsache oft

ausschlaggebend, daß die Autodyne große Ersparnisse an Elektroenergie erzielen läßt.

Es ist selbstverständlich, daß der Wirkungsgrad der Autodyne bedeutend höher ist als der des Motorgenerators, worauf aber im folgenden hingewiesen werden muß, ist die interessante Tatsache, daß die Autodyne imstande ist, gleichzeitig mit der Abgabe der Wattleistung auch große Mengen von Blindleistung in das Netz abzugeben, und zwar in weit größeren Mengen, als dies bei Verwendung eines Einankerumformers oder eines von einem Synchronmotor angetriebenen Generators der Fall wäre. Diese Tatsache wird auf Grund folgender Überlegungen klar :

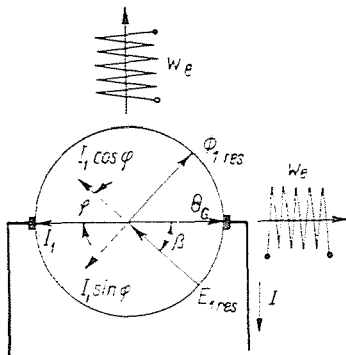


Abb. 38

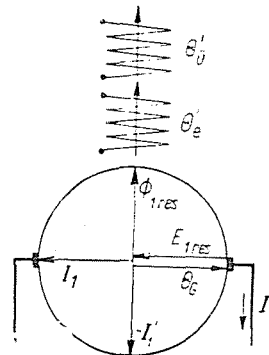


Abb. 39

Im Anker der Autodyne mit schlüpfender Statorerregung fließt beim Leerlauf praktisch kein Wechselstrom. Bei Belastung erzeugt der Gleichstrom im Rotor die Durchflutung θ_G (Abb. 38), die einen Kompensations-Wechselstrom \bar{I}_1 hervorruft. Die Komponente $\bar{I}_1 \cos \varphi$ stellt den Wirkstrom dar, während die Komponente $\bar{I}_1 \sin \varphi$ einen voreilenden Blindstrom darstellt. Auf diese Weise geht die Maschine, wenn sich die Wattbelastung wegen der Verkleinerung von U bei Konstanz des Stromes I verkleinert, selbsttätig in den Betriebszustand des Phasenkompensators über und verbessert den $\cos \varphi$ des Netzes.

Hierbei muß man unterstreichen, daß diese Tatsache nichts Gemeinsames mit der aus der Theorie des gewöhnlichen Einankerumformers bekannten Erscheinung hat, die darin besteht, daß man voreilenden Strom mit Hilfe der Vergrößerung der Durchflutung der Statorerregung erhalten kann (Abb. 39). In dieser Maschine ist der Strom I_1 , der die Durchflutung θ_G des Stromes I kompensiert, ein Wattstrom, da $\beta \approx 0$ ist. Daraus folgt, daß wenn die Durchflutung θ_e genügend groß zur Bildung eines Flusses ist, der die Spannung E_{1res} induziert, der Blindstrom gleich 0 ist. Man kann ihn aber als Strom $-I_1'$ erhalten, wenn man zu θ_e die Durchflutung der »Übererregung« θ_u' hinzufügt, welche durch den Strom $-I_1'$ kompensiert wird.

Die Erzeugung der Durchflutung Θ'_a ist mit zusätzlichen Verlusten im Stator und mit einer entsprechenden Vergrößerung seiner Dimensionen verbunden. Gleichzeitig ruft der voreilende Strom I'_1 zusätzliche Verluste im Anker hervor, was auch eine Vergrößerung seiner Dimensionen verlangt.

Die Bedingungen der Entstehung eines voreilenden Stromes in der Autodyne sind prinzipiell ganz andere. Hier tritt, im Gegensatz zur »Statorübererregung«, eine Erscheinung auf, welche man »Rotorübererregung« nennen könnte. Wie aus Abb. 38 ersichtlich ist, besitzt die Grundwelle der Rotordurchflutung des Gleichstroms Θ_G eine Komponente, die mit dem Fluß $\bar{\Phi}_{1, res}$ zusammenfällt. Da der Fluß bereits durch die Durchflutungen der Wicklungen w'_e und w_e gewährleistet ist, ruft die erwähnte Komponente einen Kompensationsstrom in Form einer voreilenden Komponente $I_1 \sin \varphi$ des Wechselstroms hervor. Diese Komponente ruft also in der Autodyne keine entsprechenden Verluste und keine Vergrößerung der Dimensionen des Stators hervor, da diese bereits durch die Größen I_1 und I bestimmt sind. Da im Anker der Autodyne im allgemeinen ein großer Teil der Wicklung vom Gleichstrom und vom entgegengesetzt gerichteten Wechselstrom durchflossen wird, die zusammen einen resultierenden Strom von kleinerer Größe bilden, so zeigt sich, daß in der Autodyne bei $U = 0$ und bei Abgabe des maximalen voreilenden Stromes die Verluste bedeutend kleiner sein werden als im Einankerumformer der Abb. 39, sogar wenn er beim Leerlauf nur einen voreilenden Strom I'_1 derselben Größe abgeben würde.

Die erwähnte Erscheinung der Rotorübererregung kann zur äußerst effektiven Erzeugung eines voreilenden Stromes in allen jenen Schemas der Autodyne ausgenutzt werden, in denen das Regeln in den Grenzen $U_{max} > U > 0$ vor sich geht. Die Verringerung der Verluste im Umformer und auch die Abgabe voreilenden Stromes durch die Autodyne bringt große Ersparnisse an elektrischer Energie mit sich.

Ersetzen wir z. B. einen Motorgenerator von der Leistung 10 kW, dessen Motor 8 BkVA Blindleistung aufnimmt, durch eine Autodyne derselben Leistung, die 7 BkVA Blindleistung in das Netz abgibt, so bedeutet das, daß die letztere im Vergleich zum ersteren 15 BkVA Blindleistung abgibt.

Um im Falle der Anwendung eines durch einen Asynchronmotor angetriebenen Generators eine zusätzliche Leistung von 15 kVA bei voreilem Strom zu erhalten, müßte man außer einem Generator für 10 kW und einem Motor für etwa 13 kW noch einen speziellen Kompensator für 15 kVA haben. Dabei würde aber ein Teil des mit Hilfe des letzteren erhaltenen Gewinnes an Wirkleistung, infolge der in ihm auftretenden inneren Verluste, verloren gehen, während die Abgabe eines voreilenden Stromes in der Autodyne, wie oben erläutert wurde, nicht mit einer Erhöhung von Verlusten verbunden ist.

Diese Eigenschaft der Autodyne stellt einen ihrer Hauptvorteile im Vergleich zu jenen Anordnungen dar, in denen Gleichrichter zur Erzeugung einer stufenlos regelbaren Gleichspannung verwendet werden (z. B. mit Hilfe von Drosselspulen geregelte Trockengleichrichter oder Quecksilbergleichrichter mit Gittersteuerung) und die, wie bekannt, im Mittlern einen ziemlich niedrigen Leistungsfaktor aufweisen.

Zusammenfassung

Einleitend analysiert der Verfasser kritisch die bisher bekannt gewordenen Versuche, die Gleichspannung des Einankerumformers stufenlos zu regeln, sowie die Ursachen der bisherigen Mißerfolge dieser Versuche. Ausgehend von dieser Analyse stellt sich der Verfasser die Aufgabe, die aus einem Gleichstromgenerator und einem Wechselstrommotor bestehende Maschinengruppe durch eine einzige Maschine zu ersetzen, die nicht nur die stufenlose Regelung der Gleichspannung ermöglicht, sondern auch die selbsttätige Regelung auf Grund gewünschter spezieller Kennlinien und Gesetzmäßigkeiten, wobei sie auch als Verstärkermaschine verwendet werden kann.

Diese Aufgabe wurde schrittweise gelöst

a) mit Hilfe eines magnetischen Systems, das sich im indifferenten Gleichgewichte befindet und sehr empfindlich auf steuernde Durchflutungsimpulse reagiert,

b) mit Hilfe von »schlüpfenden Statordurchflutungen«, die das Reibungsmoment kompensieren,

c) mit Hilfe von Maßnahmen, die bei Stoßbelastungen das Auftreten von Stromwendungsschwierigkeiten und des Pendelns ausschließen,

d) mit Hilfe einer negativen Rückkoppelung der Änderung der Gleichstromspannung auf die steuernden Durchflutungen, durch die eine neue Maschine — die Autodyne — entsteht, die selbsttätig derart regelt, daß das durch die steuernden Durchflutungen erzeugte Drehmoment verschwinde, wodurch je nach der Schaltung der Rückkoppelung die verschiedensten Aufgaben der Automatik gelöst werden können,

e) mit Hilfe der Anwendung der »schlüpfenden Statorerregung«, die das Problem der stationären Stromwendung löst und — kombiniert mit dem Prinzip der »Rotorübererregung« — die Abgabe großer Mengen von Blindleistung in das Netz ermöglicht.

Prof. DR. O. BENEDIKT, Budapest, Múegyetem rakpart 3, Ungarn.